

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

**EP 0 738 004 A1**

(12)

**EUROPEAN PATENT APPLICATION**

published in accordance with Art. 158(3) EPC

(43) Date of publication:

16.10.1996 Bulletin 1996/42

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: **H01L 21/76**, **H01L 21/265**,**H01J 37/317**(21) Application number: **95904026.2**

(86) International application number:

**PCT/JP94/02297**(22) Date of filing: **28.12.1994**

(87) International publication number:

**WO 95/18462 (06.07.1995 Gazette 1995/29)**

(84) Designated Contracting States:

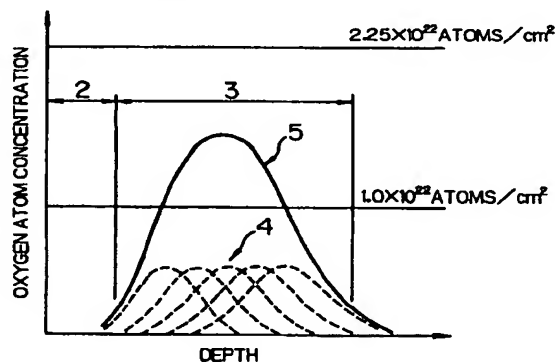
**DE FR GB**(30) Priority: **28.12.1993 JP 337894/93**(71) Applicant: **Nippon Steel Corporation**  
**Chiyoda-ku Tokyo 100 (JP)**

(72) Inventors:

- **TACHIMORI, Masaharu**  
**Electronics Kenkyusho of**  
**Sagamihara-shi Kanagawa 229 (JP)**

• **YANO, Takayuki****Hikari Seltetsusho of Nippon Steel**  
**Yamaguchi 743 (JP)**• **HAMAGUCHI, Isao****Hikari Seltetsusho of Nippon Steel**  
**Yamaguchi 743 (JP)**• **NAKAJIMA, Tatsuo****Hikari Seltetsusho of Nippon**  
**Yamaguchi 743 (JP)**(74) Representative: **VOSSIUS & PARTNER****Siebertstrasse 4**  
**81675 München (DE)****(54) METHOD AND DEVICE FOR MANUFACTURING SEMICONDUCTOR SUBSTRATE**

(57) A method for manufacturing an SOI semiconductor substrate and a manufacturing apparatus therefor in which a mean implantation depth and a dose of each of a series of oxygen ion implantations are continuously or stepwise changed, a depthwise distribution of an oxygen atom concentration has a single peak and uniform in a plane at a predetermined depth, a maximum oxygen atom concentration is preferably no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, a total oxygen dose is equal to a desired thickness of a buried oxide film multiplied by  $4.48 \times 10^{22}$ , and preferably a thermal process at a temperature of 1300°C or higher is applied after the completion of the oxygen ion implantation to form the buried oxide film.

**FIG. 1B**

## Description

### TECHNICAL FIELD

The present invention relates to a manufacturing method of a semiconductor substrate and an apparatus for manufacturing the same, and more particularly to a method for manufacturing a silicon-on-insulator (hereinafter referred to as SOI) type semiconductor substrate by implanting oxygen ions into a silicon substrate and an apparatus for manufacturing the same.

### BACKGROUND ART

The formation of an insulation layer by implanting ions into a semiconductor substrate is a well-known technique as disclosed in Japanese Patent Publication No. 49-39233. In the past, as a method for implanting oxygen ions into a single crystal silicon substrate to form a silicon oxide film which is an electrically insulative material (hereinafter referred to as a buried oxide layer) in the substrate and form a single crystal silicon layer having a uniform thickness over an entire surface of the substrate on the buried oxide layer, the following methods have been known.

Japanese Patent Publication No. 62-12658 discloses a method of ion-implanting oxygen into a single crystal substrate kept at a temperature of 200°C or higher to result in a concentration which is as 1.5 times as large as an oxygen concentration ( $4.5 \times 10^{22}$  ions/cm<sup>3</sup>) in a uniform insulation layer to form a discrete boundary between the buried oxide layer and the single crystal silicon layer on the surface. This method, however, has a defect in that the dislocation density in the single crystal silicon layer on the surface is  $10^5$  /cm<sup>3</sup> or higher.

JP-A-62-188239 and U.S. Patent No. 4,676,841 disclose a method for forming a sharp boundary free from non-stoichiometric silicon dioxide at the boundary of the single crystal silicon layer and the buried oxide film by implanting oxygen ions into the silicon substrate at an energies of 100 to 400 KeV and a dose of  $5 \times 10^{17}$  to  $5 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> and thermally processing it in an nitrogen atmosphere at a temperature of at least 1300°C for six hours to ten minutes. This method, however, has a defect in that the dislocation density in the single crystal silicon layer on the surface is  $10^3$  /cm<sup>2</sup> or higher and a continuous buried oxide film cannot be formed.

JP-A-64-17444 discloses a method for forming an oxide or nitride buried insulation layer by conducting multiple continuous implantations of oxygen or nitrogen ions into the silicon substrate at the same energy and a dose of  $1.5 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup>, and after each implantation, annealing the substrate at a temperature no lower than 800°C and no higher than a melting point of the substrate. This method, however, has a defect in that the dislocation density in the single crystal silicon layer on

the surface is no higher than  $10^5$  /cm<sup>2</sup> but it is not lower than  $10^3$  /cm<sup>2</sup>.

JP-A-2-191357 discloses a method for preventing channelling in the oxygen ion implantation by implanting silicon ions at a concentration of  $10^{18}$  ions/cm<sup>3</sup> to such a depth that the oxygen ion concentration exhibits  $10^{21}$  ions/cm<sup>3</sup> (shallower one of two) to make it amorphous and then implanting oxygen ions, and preventing the occurrence of crystal defect in a surface silicon layer which is induced by void holes or excess oxygen by reducing the void holes and excess oxygen by implanted silicon. However, this method has a defect in that the dislocation in the single crystal silicon layer on the surface rather increases due to the silicon atoms and the excess implanted silicon atoms generated in the lattices in the course of the formation reaction of the buried oxide film.

JP-A-3-240230 discloses a method for forming a thin surface single crystal silicon layer on a buried oxide film of a predetermined film thickness while preventing the generation of crystal defect by reducing the oxygen ion dose, by applying a first thermal process to a silicon substrate to which oxygen ions have been implanted at a first implantation energy, specifically applying the thermal process in an Ar atmosphere at 1320°C for six hours to form a first buried oxide film, and then implanting smaller amount of oxygen ions than that of the first implantation at a second implantation energy lower than the first implantation energy and applying the same thermal processing as that of the first thermal processing to form a second buried oxide film superimposed on the first buried oxide film. However, this method cannot reduce the oxygen ion dose to attain the buried oxide film of the predetermined thickness and the dislocation density in the single crystal silicon layer on the surface is  $10^3$  /cm<sup>2</sup> or higher.

JP-A-4-249323 discloses a method for implanting first oxygen ions into a major surface of a silicon substrate at a first high energy which imparts an oxygen concentration distribution in which the oxygen concentration is maximum at a position below the major surface of the silicon substrate, then thermally processing the silicon substrate to form a buried oxide film in the silicon substrate, then implanting second oxygen ions into the major surface of the silicon substrate at a second high energy which imparts an oxygen concentration distribution in which the oxygen distribution is maximum in a vicinity of interface between the buried oxide film and the overlying surface silicon layer, and then thermally processing the silicon substrate to make the interface between the buried oxide film and the surface single crystal silicon layer planar. However, this method has a defect in that the dislocation density in the surface single crystal semiconductor silicon layer is  $10^3$  /cm<sup>2</sup> or higher.

JP-A-4-264724 discloses a method for making the dislocation in the surface single crystal silicon layer to  $10^3$  /cm<sup>2</sup> or lower by implanting oxygen ions into the silicon substrate at an acceleration energy of 150 KeV to

200 KeV and a dose of no smaller than  $0.25 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> and no larger than  $0.50 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> or no smaller than  $0.80 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> and no larger than  $1.30 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> and then thermally processing it at a high temperature of 1300°C or higher. However, as disclosed by S. Nakashima et al in J. Mater. Res., Vol. 8 (1993), pp. 523-534, this method includes the following defect. When the oxygen ion dose is no higher than  $0.3 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup>, a continuous buried oxide film is not always formed and dislocations of  $10^3$  /cm<sup>2</sup> or higher are generated in the single crystal silicon layer on the buried oxide film. These dislocations cause a current leakage of semiconductor devices formed on the SOI structure and deteriorate the characteristic of the semiconductor devices. When the oxygen ion dose is no smaller than  $0.4 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> and no larger than  $1.2 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup>, an imperfect silicon oxide film including silicon grains is formed. The buried oxide film which includes the silicon grains has a low dielectric breakdown voltage and deteriorates the characteristic of the semiconductor devices formed on the SOI structure. When the oxygen ion dose exceeds  $1.2 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup>, dislocations of  $10^3 \sim 10^9$  /cm<sup>2</sup> occur in the single crystal silicon layer on the buried oxide film. When the oxygen ion dose is no smaller than  $0.3 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> and no larger than  $0.4 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup>, the dislocation density in the single crystal silicon layer on the buried oxide film is no larger than  $10^3$  /cm<sup>2</sup> and the continuous buried oxide film including no silicon grain is formed but, in this case, the thickness of the buried oxide layer is limited to approximately 70 to 90 nm. In this connection, Y. Li et al discusses in J. Appl. Phys., Vol. 70 (1991), pp.3605-3612 a critical oxygen ion dose at which the continuous buried oxide film is formed as a function of a projected range of the oxygen ions. A. K. Robinson et al discloses in Mater. Sci. Eng., B12 (1992), pp.41-45 that the oxygen ion dose at which the buried oxide film including no silicon grain is formed and the single crystal silicon layer with few dislocations is formed is  $0.33 \times 10^{18}$  ions/cm<sup>2</sup> for the implantation energy of 70 KeV.

JP-A-4-737 discloses a method for simply forming a silicon layer of sufficiently thin thickness such as 80 nm on a buried oxide film of sufficiently large thickness such as 400 nm in which a cap film comprising a silicon oxide film or a silicon nitride film is formed on a silicon substrate, then oxygen ions are implanted into the silicon substrate through the cap film, then it is thermally processed to form a buried oxide film, and the cap film is removed before or after the thermal process. However, this method does not always allow the formation of the continuous and homogeneous buried oxide film and the single crystal silicon layer with low dislocations.

U.S. Patent No. 5,080,730 discloses a method for forming a narrow buried oxide film by reducing an implantation energy to compensate for the erosion of the surface of the silicon substrate by the ion beam when the oxygen or nitrogen ions are implanted into the silicon substrate so that the ions are implanted into the

same position of the silicon substrate, and a method for forming a wide buried insulation film by increasing the implantation energy to compensate for the erosion of the surface of the silicon substrate by the ion beam. However, this method does not always allow the formation of the continuous and homogeneous buried insulation film of a desired thickness and the single crystal silicon layer with low dislocations.

## DISCLOSURE OF THE INVENTION

It is an object of the present invention to provide a method for manufacturing an SOI type semiconductor substrate by implanting oxygen ions in a silicon substrate in which the number of dislocations in a single crystal silicon layer on a buried oxide film which is an insulation material is less than  $10^3$  /cm<sup>2</sup> and which allows the formation of the continuous buried oxide film including no silicon grain. It is also an object of the present invention to provide a manufacturing method for forming a buried oxide film having a thickness of 90 nm or larger.

It is another object of the present invention to provide an apparatus for implementing the above method.

In order to achieve the above objects of the present invention, a method for manufacturing an SOI type semiconductor substrate of the present invention comprises the step of implanting oxygen ions into a major surface of a silicon substrate to obtain a maximum oxygen atom concentration being no larger than  $4 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>.

An apparatus for manufacturing a semiconductor substrate of the present invention comprises a first processing unit for receiving ion implantation conditions in a series of ion implantation processes to output the implanted atom concentration distribution in the substrate for each implantation condition, a second processing unit for receiving the output of said first processing unit to output an accumulated atom concentration distribution which is the sum of the implanted atom concentration distribution in the substrate for each ion implantation condition over the series of ion implantations, a third processing unit for receiving the output of said second processing unit as a first input and one of conditions to be met by a desired atom concentration distribution as a second input to determine whether said first input matches to said second input or not and outputting a first output representing the decision and a second output representing a difference between said first input and said second input, and a fourth processing unit for receiving the first and second outputs of said third processing unit as first and second inputs. Respectively to output the series of ion implantation conditions inputted to said first processing unit as a first output when the first output of said third processing unit is affirmative, and output a second output indicating a correction amount to correct a selected one of the series of ion implantation conditions inputted to said first

processing unit to decrease the second input when the first output of said third processing unit is negative.

## BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Figs. 1A through 1C show substrate sectional views (Figs. 1A and 1C) in an implantation process and an oxygen atom concentration distribution (Fig. 1B) of a substrate by the implantation to illustrate an implantation condition when oxygen ions are implanted into the substrate by the manufacturing method of the present invention,

Figs. 2A and 2B illustrate various methods for changing a depthwise position of the oxygen ion implantation,

Figs. 3A and 3B show block diagrams of a configuration of a manufacturing apparatus in accordance with one embodiment of the present invention,

Fig. 4A is a characteristic curve showing a relation between a maximum oxygen atom concentration in the substrate and a dislocation density in the single crystal silicon layer on the buried oxide film,

Figs. 4B and 4C show sectional views for illustrating a change in the sectional state of the substrate by the change of the maximum oxygen atom concentration,

Fig. 5A shows a relation between the maximum oxygen atom concentration and a form of the buried oxide film,

Figs. 5B and 5C show sectional views of the substrate after the oxygen ion implantation and after the thermal process when the maximum oxygen atom concentration is larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup> and not larger than  $4 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup>, Fig. 6 illustrates an affect by a shape of a distribution curve of the oxygen atom concentration to the form of the buried oxide film,

Fig. 7 shows a depthwise distribution of the oxygen atom concentration of the silicon substrate manufactured by the present invention,

Fig. 8 shows another depthwise distribution of the oxygen atom concentration of the silicon substrate manufactured by the present invention,

Fig. 9A shows a state of change of the implantation energy and an oxygen ion dose in the oxygen ion implantation,

Fig. 9B shows a depthwise distribution of the oxygen atom concentration of the silicon substrate when the implantation energy is changed as shown in Fig. 9A, and

Figs. 10 and 11 show other examples of depthwise distribution of the oxygen atom concentration of the silicon substrate manufactured by the present invention.

## BEST MODE FOR CARRYING OUT THE INVENTION

Referring to the accompanying drawings, a method for manufacturing a silicon substrate in accordance with the present invention is explained.

As shown in Fig. 1A, in accordance with the present invention, oxygen ions are implanted into a major surface of a silicon substrate 1 and then it is thermally processed to change a silicon layer 2 of the surface having a number of crystal defects created by the ion implantation into a single crystal silicon layer 2' of reduced number of crystal defects, as shown in Fig. 1C, and oxygen atoms implanted into an oxygen ion implantation area 3 are reacted with silicon atoms of the substrate and an implantation condition to form a continuous and homogeneous silicon oxide film, that is, a buried oxide layer 3' is determined in the following manner.

A series of oxygen ion implantation process may be conducted continuously or intermittently. When it is conducted continuously, the oxygen implantation condition, that is, a mean implantation depth and an ion dose are changed stepwise or continuously while continuing the implantation. When the oxygen implantation process is continuously conducted and the implantation condition is changed while continuing the implantation, the implantation condition at each of predetermined time points in a process execution period is determined such that a final oxygen concentration distribution derived by a series of processes meets the following conditions:

(1) As shown in Fig. 1B, in a series of oxygen ion implantation processes, a mean implantation depth and an ion dose of the oxygen ion implantation 4 in each process are continuously or stepwise changed such that a depthwise distribution 5 of the oxygen atom concentration derived by the series of oxygen ion implantation processes has one peak and continuously decreases before and after the peak.

(2) The peak of the oxygen atom concentration distribution 5 which is also a maximum value is set to no larger than  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup>, and preferably no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup> and the total dose (in ions/cm<sup>2</sup>) in the series of oxygen ion implantations is set to a value of a desired thickness (in cm) of the buried oxide film multiplied by  $4.48 \times 10^{22}$ .

(3) The change of the implantation depth of the oxygen ions is conducted by changing an implantation energy, removing a surface 6 of the silicon substrate 1 as shown in Fig. 2A and depositing a film 7 on the surface of the silicon substrate 1 as shown in Fig. 2B.

(4) Thermal process is conducted at a high temperature of 1300°C or higher after the completion of the series of oxygen ion implantations to form a stoichiometric buried oxide film 3' and a single crystal silicon layer 2' having less crystal defects.

A relation between the dislocations in the semiconductor silicon layer on the buried oxide film and the oxygen dose in the method for forming the single crystal silicon layer having a uniform thickness over the entire surface of the substrate on the buried oxide film which is the insulation material by implanting the oxygen ions into the silicon substrate is reported by S. Nakashima et al in J. Mater. Res., Vol.8, (1993), pp.523-534. According to the investigation by the inventors of the present invention on the generation of dislocations in the single crystal silicon layer on the buried oxide film, it has been proved that the number of dislocations in the single crystal silicon layer does not necessarily depend on the dose of the oxygen ions but it essentially depends on the maximum concentration of the oxygen atoms implanted in the silicon substrate. When the oxygen ion implantation into the silicon substrate is continued, the oxygen atom concentration in the silicon substrate increases and when the oxygen atom concentration exceeds  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, the formation of a non-stoichiometric silicon oxide film 22 in which silicon is microscopically mixed with an SiO<sub>2</sub> phase as shown in Fig. 4B is observed. When the oxygen atom concentration reaches  $4.48 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, a stoichiometric silicon oxide film is formed. It has been proved that when the oxygen ions are further implanted after the formation of the non-stoichiometric silicon oxide film 22 in the silicon substrate, the concentration of the dislocations 23 in the single crystal silicon 2' on the buried oxide film 3' after the thermal process rapidly increases as shown in Fig. 4C. The increase of the dislocations is also proved by the oxygen ion implantation after the formation of the stoichiometric silicon oxide film. Fig. 4A shows a relation between a maximum oxygen atom concentration implanted in the silicon substrate and a dislocation density. When the oxygen atom concentration is  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> or lower, that is, when the formation of the non-stoichiometric silicon oxide film is not observed during the oxygen ion implantation, the dislocation density is lower than  $10^3$  /cm<sup>2</sup>, and when the oxygen atom concentration exceeds  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> is observed, that is, when the formation of the non-stoichiometric silicon oxide film or the formation of the stoichiometric silicon oxide film is observed, the dislocation density is  $10^3$  /cm<sup>2</sup> or higher.

When the oxygen ion implantation and the thermal process are repeated in a plurality of cycles, the oxygen atom concentration in the silicon substrate after the implantation of the oxygen ions in one run may not exceed  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> but the oxygen atom concentration after the next thermal process may exceed  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> by the movement of the oxygen atoms during the next thermal process. In such a case, the dislocation density in the semiconductor silicon film on the buried oxide film exceeds  $10^3$  dislocations/cm<sup>2</sup> if the oxygen ions are implanted in the next run. Accordingly, the formation of the buried oxide film and the overlying single crystal silicon layer in the course of the series of oxygen ion implantation should be avoided. In

the present invention, in order to keep the dislocation density in the single crystal silicon layer on the buried oxide film to lower than  $10^3$  /cm<sup>2</sup>, the maximum oxygen atom concentration in the silicon substrate is kept no larger than  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> during the implantation of the oxygen ions into the silicon substrate and the thermal process at 1300°C or higher to form the buried oxide film and the overlying single crystal silicon is conducted after the completion of the series of oxygen ion implantations.

As a result of the investigation of the relation between the oxygen atom concentration after the ion implantation and the form of the buried oxide film formed by the reaction of the implanted oxygen atoms and the silicon atoms, it has been proved that the form of the buried oxide film depends on the maximum oxygen atom concentration. In Fig. 5A, in a range 27 where the maximum oxygen atom concentration exceeds  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, a homogeneous and continuous buried oxide film or a continuous buried oxide film including a small amount of silicon grains in the vicinity of the interfaces to the upper or lower single crystal silicon substrates is formed. In a range 26 where the oxygen atom concentration is larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup> and no larger than  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>2</sup>, a buried oxide film including silicon grains is formed. In a range 25 where the maximum oxygen atom concentration is no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, a homogeneous and continuous buried oxide film is formed. In a range 24 where the maximum oxygen atom concentration is smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, a discontinuous buried oxide film is formed. Where the maximum value of the oxygen atom concentration exceeds  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, an area where the oxygen atom concentration is larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no larger than  $4.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> comprises a microscopic mixture of an area 28 which is clearly rich in SiO<sub>2</sub> and an area 29 which is rich in Si, as seen by Auger electron spectroscopy and as shown in Fig. 5B. When such a mixture layer 30 is thermally processed at a temperature of 1300°C or higher, the oxygen atoms present in the area 29 which is rich in Si are taken into the area 28 which is rich in SiO<sub>2</sub> as shown in Fig. 5C so that a buried oxide film 28' is grown from the area 28 while the area 29 is changed to silicon grains 29' having the oxygen atom concentration in the order of solid solubility and it is left while it is surrounded by the buried oxide film 28'. When the size of the silicon grains is sufficiently small, the silicon grains are dissolved and diffused into the buried oxide film and eliminated by applying the high temperature thermal process for a sufficiently long time. But the silicon grains 29' often remain. When the maximum value of the oxygen atom concentration is no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, the area which is rich in SiO<sub>2</sub> and the area which is rich in Si cannot be clearly distinguished in the area in which the oxygen ions have been implanted even by the Auger electro spectroscopy, and when this

layer is thermally processed at a temperature of 1300°C or higher, a buried oxide film including no silicon grain is formed. When the maximum oxygen atom concentration is smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, oxygen atoms must be collected from an adjacent area which is several times as large as the size of SiO<sub>2</sub> segregates, in the process of forming the stoichiometric buried oxide film by the thermal process at a temperature of 1300°C or higher. Since the size of SiO<sub>2</sub> segregates which are stable at the temperature of 1300°C or higher is several tens nm or larger, the stable size is not attained by collecting the oxygen atoms only from the depthwise adjacent area and hence the oxygen atoms may have to be collected from the laterally adjacent area. In such a case, the laterally adjacent area from where the oxygen atoms have been taken remains as the silicon layer so that SiO<sub>2</sub> segregates are not grown to a continuous buried oxide film. Accordingly, in accordance with the present invention, in order to attain the continuous buried oxide film including no silicon grain, the maximum value of the implanted oxygen atom density is set to no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>.

When the maximum value of the oxygen atom concentration is no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and where there are a plurality of peaks in the depthwise distribution and the lateral distribution of the oxygen atom concentration, the buried oxide film including silicon grains or the discontinuous buried oxide film may be formed by applying the thermal process. This is explained with reference to Fig. 6. In Fig. 6, a solid line shows the oxygen atom concentration distribution in the silicon substrate immediately after the oxygen ion implantation, and a broken line shows the oxygen atom concentration distribution in the silicon substrate after the application of the thermal process at the temperature of 1300°C or higher. The oxygen atoms which are present in the silicon substrate beyond the solid solubility are readily segregated as the silicon oxide by the thermal process. They are segregated preferentially from points having a higher oxygen atom concentration than that of the surrounding area, that is, from the points 31 and 32 where the oxygen atom concentration exhibits a peak, and they are grown. As the segregation progresses and the oxygen atom concentration in the silicon substrate around the segregates is decreased to the order of the solid solubility, small segregates which are smaller than a critical size determined by the thermal process temperature are dissolved and the oxygen atoms are taken into large segregates which are larger than the critical size. Where a plurality of segregates larger than the critical size remain, the continuous buried oxide film may not be formed because the area 35 of the silicon layer in which the oxygen atom concentration has been reduced to the order of the solid solubility remains between the segregation area 33 and the segregation area 34. Accordingly, in order to form the homogeneous and continuous buried oxide film at the uniform depth, it is preferable

that the depthwise distribution of the implanted oxygen atom concentration has a single peak and continuously decreases before and after the peak and the lateral distribution, that is, the distribution in a plane of a constant depth is uniform.

A method for increasing the film thickness of the continuous buried oxide film is now explained. Since the film thickness (in cm) of the buried oxide film is substantially equal to a quotient of the oxygen ion dose (in ions/cm<sup>2</sup>) divided by  $4.48 \times 10^{22}$ , the oxygen ion dose may be increased in order to increase the thickness of the buried oxide film. However, when the dose is increased while the implantation energy of the oxygen ions is fixed as it is in the prior art, the maximum concentration of the oxygen atoms will exceed  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> at a certain dose or higher because the maximum value of the implanted ion concentration is approximately  $0.4\phi/\sigma$  (where  $\phi$  is the ion dose and  $\sigma$  is a standard deviation of the implantation depth) as shown in the formula (4.2), on page 22 of "PROJECTED RANGE STATISTICS" by James F. Gibbons, William S. Johnson and Steven W. Mylroie (published by Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.). For example, when the oxygen ions are implanted into the silicon substrate held at 550°C at the energy of 200 KeV, the oxygen ion dose at which the maximum value of the implanted oxygen atom concentration reaches  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> is approximately  $5 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> and the thickness of the buried oxide film formed by the thermal process is approximately 112 nm. When the maximum concentration of the oxygen atoms exceeds  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>, the buried oxide film will become to include the silicon grains as described above and the oxygen dose cannot be simply increased. Referring to Fig. 1, the method of the present invention in which the oxygen ion dose is increased while the maximum value of the oxygen atom concentration is kept to no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> is explained. A broken line 4 in Fig. 1 shows the depthwise distribution of the oxygen atom concentration corresponding to the respective implantations of different mean implantation depths, and a solid line 5 shows the depthwise distribution of the oxygen atom concentration with the respective implantations being accumulated. In this manner, the series of oxygen ion implantations are conducted while the mean implantation depth is stepwise or continuously changed, and implantation dose for the respective mean implantation depths are controlled such that the maximum value of the accumulated oxygen atom concentration falls within the range described above and the total oxygen ion dose reaches the dose required to attain the buried oxide film of a predetermined film thickness. By conducting the implantation while changing the mean implantation depth, the implantation may be made depthwise widely and the dose necessary to attain the buried oxide film of the predetermined film thickness can be secured even with the low maximum value of the oxygen atom concentration. In implementing it, as described above, it is preferable



that the depthwise distribution of the accumulated oxygen atom concentration has a single peak and the lateral distribution is uniform.

As a method for changing the depthwise position to implant the oxygen ions, a method of changing the implantation energy of the oxygen ions, a method of implanting while removing the silicon layer 6 on the surface of the silicon substrate as shown in Fig. 2A, a method of implanting while depositing the film 7 on the surface of the silicon substrate as shown in Fig. 2B, or a combination of those methods may be used. As a specific method for removing the silicon layer 6 on the surface of the silicon substrate, polishing or grinding using grinding grains or kalium hydroxide aqueous solution, plasma etching using chlorine gas, sulfate hexafluoride gas or carbon hexafluoride gas or wet etching using aqueous solution of mixture of ammonium and hydrogen peroxide, aqueous solution of mixture of nitric acid and fluodic acid or aqueous solution of kalium hydroxide is appropriate. The constituent elements of the film 7 deposited on the surface of the silicon substrate are preferable those elements which do not adversely affect to an operation characteristic of a semiconductor electronic device built in the silicon substrate because the constituent elements of the film 7 are knocked-on into the silicon substrate in the course of the implantation of the oxygen ions into the silicon substrate through the film 7. A metal element is not preferable because it forms a deep level which adversely affects to the operation of the semiconductor electronic device, in the silicon substrate. Carbon and nitrogen are not preferable because they apt to create the crystal defects in the silicon substrate. Preferable constituent elements of the film 7 are silicon and oxygen and the film 7 is preferably the silicon film, the silicon oxide film or the combination film thereof.

Referring to Fig. 3A, an apparatus for determining the mean implantation depth and the dose in each process of the series of oxygen ion implantation processes is explained. A program is built in a processing unit 8 such that when the implantation energy of the oxygen ions, the dose and the removal amount of the surface silicon layer are inputted, the oxygen atom concentration distribution 15 in the silicon substrate when the oxygen ions are implanted into the silicon substrate under the above condition is outputted. A program is also built in the processing unit 8 such that when the name of material deposited on the silicon surface, the film thickness, the implantation energy of the oxygen ions and the dose are inputted, the oxygen atom concentration distribution 15 in the silicon substrate when the oxygen ions are implanted into the silicon substrate through the film under the above condition is outputted. In the programs built in the processing unit 8, the affect to the erosion of the silicon surface or the film deposited on the silicon surface by the ion beam during the implantation of the oxygen ions, the channelling caused by the crystal orientation of the silicon substrate and the incident direction of the ion beam, and the affect of the silicon

substrate temperature during the ion implantation are taken into consideration. As a method in the processing unit 8 for outputting the oxygen atom concentration distribution 15 in the silicon substrate from the input of the implantation condition 14 in each process of the series of oxygen ion implantation processes such as the oxygen implantation energy and the dose, a method for taking out the prestored data determined by experiment or calculation and outputting it or a method for calculating on site by a predetermined formula and output it may be used. The calculation formula to be programmed in the processing unit 8 may be the computer simulation code TRIM disclosed by J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark in "The Stopping and Ranges of Ions in Solids", Vol.1, by J. F. Ziegler (published by Pergamon, New York, 1985), or the computer program code IRIS disclosed by U.Bussmann and P. L. F. Hemment in Nucl. Instrum. methods B. 47 (1990), p.22. It may also be determined by experiment. A program is built in a processing unit 9 such that when the respective oxygen atom concentration distributions 15 outputted from the processing unit 8 are entered for the series of oxygen ion implantation conditions, the oxygen atom concentration distribution 16 which results from the accumulation thereof is outputted. A program is built in a processing unit 10 such that when the oxygen atom concentration distribution 16 accumulated for the series of oxygen ion implantations outputted from the processing unit 9 and a desired oxygen atom concentration distribution 17 are inputted, the matching thereof is determined and the result of matching and a difference 18 between both distributions are outputted. A program is built in a processing unit 11 such that when the result of determination outputted from the processing unit 10 and the difference 18 between the accumulated oxygen atom concentration distribution and the desired oxygen atom concentration distribution are inputted and if the matching is determined, a series of oxygen ion implantation conditions 19, at that time that is, the implantation energy, the dose, the name of material of the film deposited on the silicon substrate and the film thickness thereof or the removal amount of the silicon surface are outputted, and if the determination indicates the mismatching, a series of oxygen ion implantation conditions 20 which are modified to reduce the difference 17 between the accumulated oxygen atom concentration distribution 16 and the desired oxygen atom concentration distribution 17 are outputted. The number of times of oxygen implantation processes to attain the desired oxygen atom concentration distribution and the oxygen implantation condition in each process initially applied to the processing unit are determined by experiment based on the difference from the desired oxygen atom concentration distribution 17. Which one of the series of oxygen implantation conditions is to be modified is determined by experiment based on the comparison of the state of the accumulated oxygen atom concentration distribution and the state of the desired oxygen atom concentration distribution 17. The series of modified oxygen ion

implantation conditions 20 outputted from the processing unit 11 are fed back to the input of the processing unit 8. When the processing units 8~11 are connected, the series of oxygen ion implantation conditions 14 are initially set to the processing unit 8 and the desired oxygen atom concentration distribution 17 is inputted to the processing unit 10, the processing unit 11 determines and outputs the series of optimum oxygen ion implantation conditions 19.

In the above description, one of the inputs of the processing unit 10 is the desired oxygen atom concentration distribution 17. Alternatively, the condition to be met by the oxygen atom concentration distribution as defined by the present invention may be used as the input.

The above conditions may be as follows:

- (a) The maximum oxygen atom concentration is no larger than  $4 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>.
- (b) The maximum oxygen atom concentration is no larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and no smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>.
- (c) The depthwise distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate has a single peak and continuously decreases before and after the peak.
- (d) The distribution of the oxygen atom concentration in the plane of the predetermined depth in the silicon substrate is uniform.
- (e) The total oxygen ion dose is equal to a value of the thickness (in cm) of the desired buried oxide film multiplied by  $4.48 \times 10^{22}$ .

In this case, a program is built in the processing unit 10 such that when the accumulated oxygen atom concentration distribution 16 for the series of oxygen ions implantations outputted from the processing unit 9 and the condition 17 to be met by the oxygen atom concentration distribution as defined by the present invention are inputted, whether the accumulated oxygen atom concentration distribution 16 meets the condition 17 to be met by the oxygen atom concentration distribution as defined by the present invention or not is determined, and the result of determination and the difference 18 between the value corresponding to the above condition for the accumulated oxygen atom concentration distribution 16 and the value of the above condition are outputted. Accordingly, a program is built in the processing unit 11 such that when the result of the determination outputted from the processing unit 10 and the difference 18 between the accumulated oxygen atom concentration distribution and the condition to be met by the oxygen atom concentration distribution as defined by the present invention are inputted, the implantation condition 19 in the series of oxygen ion implantations are outputted when the determination indicate the matching, and a series of oxygen ion implantation conditions 20 modified to reduce the difference between the accumu-

lated oxygen atom concentration distribution 16 and the condition 17 to be met by the oxygen atom concentration distribution as defined by the present invention are outputted when the determination indicates the mismatching. In the above description, the processing units 8~11 are shown as separate units although they may be combined appropriately or further divided.

When the implantation depth is changed by the implantation energy, the efficient operation of the oxygen ion implantation apparatus is attained by inputting the output 19 of the processing unit of Fig. 3A to the control unit 12 of the oxygen ion implantation apparatus. When required, a converter 13 may be inserted between the output 19 of the processing unit and the input 21 of the oxygen ion implantation apparatus to convert the implantation energy to an acceleration voltage for the ion beam and the ion dose to an ion beam current and an implantation time.

Experimental examples when the semiconductor substrates were manufactured in accordance with the present invention are now explained.

#### Experimental Example 1

Oxygen ions of total dose of  $6.72 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> were implanted into the silicon substrate while changing the energy stepwise to form the buried oxide film having the thickness of approximately 150 nm in the silicon substrate. First, the depthwise distribution of the accumulated oxygen atom concentration derived after the series of oxygen ion implantation was set to follow the Gaussian distribution, that is,  $C(z) = Co / (2\pi)^{0.5} \sigma \exp(-(z - z_0)^2 / 2\sigma^2)$ , where  $C(z)$  is the oxygen atom concentration at the depth  $z$ ,  $Co$  is the total dose per unit area,  $\sigma$  is a standard deviation of the distribution and  $z_0$  is the depth at which the oxygen atom concentration is maximum. In this example,  $Co = 6.72 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup>,  $\sigma = 124$  nm and  $z_0 = 300$  nm. Since the maximum oxygen atom concentration is  $Co / (2\pi)^{0.5} \sigma$ , it is  $2.16 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>. Then, the implantation energy of the oxygen ions was set to four steps of 110, 140, 170 and 200 KeV and the oxygen dose at each implantation energy was set to  $1.40 \times 10^{17}$ ,  $1.60 \times 10^{17}$ ,  $1.78 \times 10^{17}$  and  $1.94 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> and the series of oxygen ion implantations were conducted to the silicon substrate kept at the temperature of 600°C. In this case, in order to make the lateral distribution of the oxygen atom concentration implanted in the silicon substrate uniform, the oxygen ion beam was uniformly scanned over the entire surface of the silicon substrate. The depthwise distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate after the oxygen implantation was measured by the secondary ion mass spectroscopy. The result is shown in Fig. 7. The distribution which substantially matched to the expected Gaussian distribution was attained and the maximum oxygen atom concentration was  $2.16 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>. The silicon substrate was placed in an electric furnace and it was thermally processed in an argon gas atmosphere



including 0.5% of oxygen at a temperature of 1330°C for six hours. After the thermal process, the silicon substrate was dipped in the hydrofluoric acid to remove the silicon oxide film having the thickness of approximately 82 nm grown during the thermal process, and the cross-sectional structure of the silicon substrate was observed by a transmission electron microscope. As a result, a single crystal silicon layer having the thickness of approximately 213 nm at the top surface and a buried oxide film having the thickness of approximately 150 nm thereunder, and a silicon substrate thereunder were observed. The buried oxide film was continuous and homogeneous and no inclusion of the silicon grain was observed. In order to count the dislocation density in the single crystal silicon layer on the top surface, a single crystal silicon layer having the thickness of approximately 5  $\mu\text{m}$  was epitaxially grown by the thermal CVD method on the single crystal silicon layer on the top surface and it was dipped in the wright etching solution for 90 seconds to visualize the crystal defects. The dislocation density was counted by an optical microscope and it was 600 / $\text{cm}^2$ . In this example, the depthwise distribution of the accumulated oxygen atom concentration derived after the series of oxygen ion implantations were assumed as the Gaussian distribution although it may be any continuous distribution having a single peak.

#### Experimental Example 2

Like in the Experimental Example 1, the oxygen ions of total dose of  $2.24 \times 10^{17}$  ions/ $\text{cm}^2$  were implanted into the silicon substrate while changing the energy stepwise to form the buried oxide film having the thickness of approximately 50 nm in the silicon substrate. The implantation energy of the oxygen ions was set to the four steps of 60, 80, 100 and 120 KeV and the oxygen dose at each implantation energy was set to  $4.35 \times 10^{16}$ ,  $5.26 \times 10^{16}$ ,  $6.05 \times 10^{16}$  and  $6.74 \times 10^{16}$  ions/ $\text{cm}^2$  and the series of oxygen ion implantations were conducted. The depthwise distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate after the oxygen implantation is shown in Fig. 8. The maximum oxygen atom concentration is  $1.01 \times 10^{22}$  atoms/ $\text{cm}^3$  at the depth of approximately 110 nm. The silicon substrate was placed in the electric furnace and thermally processed in the argon gas atmosphere including 0.5% of oxygen at the temperature of 1330°C for six hours. As a result, the SOI structure comprising the single crystal silicon layer having the thickness of approximately 58 nm and the continuous and homogeneous buried oxide film having the thickness of approximately 50 nm was formed. The dislocation density of the single crystal silicon layer was approximately 500 / $\text{cm}^2$ .

#### Experimental Example 3

The oxygen ions of the total dose of  $1.0 \times 10^{18}$  ions/ $\text{cm}^2$  were implanted into the silicon substrate while

continuously changing the implantation energy from 345 KeV to 85 KeV to form the buried oxide film having the thickness of approximately 223 nm in the silicon substrate. The dose rate was kept constant by keeping the beam current of the oxygen ion constant, and the instant dose to the implantation energy was continuously changed as shown in Fig. 9A by changing the sweep rate of the implantation energy. The depthwise distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate after the oxygen implantation was measured by the secondary ion mass spectroscopy and the result is shown in Fig. 9B. The means implantation depth of the oxygen ions was approximately 413 nm and the maximum oxygen atom concentration was approximately  $2.14 \times 10^{22}$  atoms/ $\text{cm}^2$ . The silicon substrate was thermally processed in the argon gas atmosphere including 0.5% of oxygen at 1380°C for four hours. As a result, the SOI structure comprising the single crystal silicon layer having the thickness of approximately 302 nm and the continuous and homogeneous buried oxide film having the thickness of approximately 223 nm was formed and the dislocation density of the single crystal silicon layer was approximately 700 / $\text{cm}^2$ .

#### Experimental Example 4

By etching the surface of the silicon substrate, the implantation depth of the oxygen ions was changed and the oxygen ions of the total dose of  $2.0 \times 10^{17}$  ions/ $\text{cm}^2$  were implanted at the energy of 60 KeV to form the buried oxide film having the thickness of approximately 44 nm in the silicon substrate. Each time the oxygen ions were implanted at  $5 \times 10^{16}$  ions/ $\text{cm}^2$ , the silicon substrate was dipped in the aqueous solution of the mixture of ammonium and hydrogen peroxide to remove the surface of the silicon substrate by 10 nm by the wet chemical etching, and then the remaining implantation was applied. The depthwise distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate after the oxygen ion implantation is shown in Fig. 10. The maximum oxygen atom concentration was at the depth of approximately 100 nm and the maximum concentration was approximately  $1.55 \times 10^{22}$  atoms/ $\text{cm}^2$ . By the removal of the silicon substrate surface by the etching and the sputtering of the silicon substrate surface by the ion beam during the implantation of the oxygen ions, approximately 2.5% of the dose was removed together with the silicon substrate surface. The silicon substrate was thermally processed in the argon atmosphere including 0.5% of oxygen at 1330°C for six hours. As a result, the SOI structure comprising the single crystal silicon layer having the thickness of approximately 49 nm and the continuous and homogeneous buried oxide film having the thickness of approximately 44 nm was formed. The dislocation density of the single crystal layer was approximately 400 / $\text{cm}^2$ .

## Experimental Example 5

By depositing a polycrystalline silicon film on the surface of the silicon substrate by the chemical vapor deposition, the implantation depth of the oxygen ions was changed, and the oxygen ions of the total dose of  $8.0 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup> were implanted to form the buried oxide film having the thickness of approximately 178 nm in the silicon substrate. Each time the oxygen ions were implanted at  $1 \times 10^{17}$  ions/cm<sup>2</sup>, the polycrystalline silicon film having the thickness of approximately 60 nm was deposited on the surface of the silicon substrate by the chemical vapor deposition, and then the remaining implantation was applied. The depthwise distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate after the implantation of the oxygen ions is shown in Fig. 11. The maximum oxygen atom concentration was at the depth of approximately 220 nm and the maximum concentration was approximately  $1.80 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>. The silicon substrate was thermally processed in the argon atmosphere including 0.5% of oxygen at 1330°C for six hours. As a result, the SOI structure comprising the single crystal silicon layer having the thickness of approximately 135 nm and the continuous and homogeneous buried oxide film having the thickness of approximately 178 nm was formed. The dislocation density of the single crystal silicon layer was approximately 400 /cm<sup>2</sup>.

## INDUSTRIAL APPLICABILITY

In accordance with the present invention, the semiconductor substrate having the high quality of SOI structure comprising the homogeneous and uniform buried oxide film having the thickness of 40 nm to 200 nm or larger with the dislocation density in the single crystal silicon film on the buried oxide film being no larger than  $10^3$  /cm<sup>2</sup> can be manufactured. Accordingly, by manufacturing silicon semiconductor devices such as complementary MIS transistors or bipolar transistors by using the semiconductor substrate, high performance devices with less leakage current and high insulation breakdown voltage are attained.

## Claims

1. A method for manufacturing an SOI type semiconductor substrate comprising the step of:

implanting oxygen ions to a silicon substrate from a major surface thereof so that a maximum oxygen atom concentration is not larger than  $4 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and not smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>.

2. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 1 wherein the oxygen ions are implanted so that the maximum oxygen atom concentration implanted to the silicon substrate is

not larger than  $2.25 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup> and not smaller than  $1.0 \times 10^{22}$  atoms/cm<sup>3</sup>.

3. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 1 wherein a depthwise distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate derived by the implantation of the oxygen ions has a single peak and continuously decreases before and after the peak.
4. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 3 wherein a distribution of the oxygen atom concentration in the silicon substrate in a plane at a predetermined depth derived by the implantation of the oxygen ions is uniform.
5. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 1 wherein a series of oxygen ion implantations are conducted such that a mean implantation depth and a dose at the mean implantation depth in each oxygen ion implantation are continuously or stepwise changed.
6. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 1 wherein a total oxygen dose (in ions/cm<sup>2</sup>) is equal to a value of a desired thickness (in cm) of a buried oxide film multiplied by  $4.48 \times 10^{22}$ .
7. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 5 wherein the mean implantation depth of each oxygen ion implantation is changed by changing the ion implantation energy.
8. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 5 wherein the mean implantation depth of each oxygen ion implantation is changed by removing the surface of the silicon substrate.
9. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 5 wherein the mean implantation depth of each oxygen ion implantation is changed by depositing a film on the surface of the silicon substrate.
10. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 9 wherein constituent elements of the film deposited on the surface of the silicon substrate are silicon or silicon and oxygen.
11. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 5 wherein the depthwise distribution of the oxygen atom concentration obtained by accumulating the depthwise distribution of the individual oxygen atom concentration corresponding to the mean implantation depth and the dose for the series of oxygen ion implantations

is compared with a predetermined depthwise distribution of the oxygen atom concentration, and the mean implantation depth and the dose in each of the series of oxygen ion implantations are determined such that both the distributions match.

5

12. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 5 wherein the depthwise distribution of the oxygen atom concentration obtained by accumulating the depthwise distribution of the individual oxygen atom concentration corresponding to the mean implantation depth and the dose for the series of oxygen ion implantations is compared with a selected oxygen atom concentration and a condition to be met by the distribution and the mean implantation depth and the dose of each oxygen ion implantation are determined such that the depthwise distribution of the accumulated oxygen atom concentration meets said condition.

10

15

20

13. A method for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 1 wherein a thermal process at a high temperature of 1300°C or higher is applied to form the buried oxide film after the completion of the oxygen ion implantation.

25

14. An apparatus for manufacturing a semiconductor substrate comprising:

a first processing unit for receiving ion implantation conditions in a series of ion implantation processes to output an implanted atom concentration distribution in the substrate for each implantation condition;

30

a second processing unit for receiving the output of said first processing unit to output an accumulated atom concentration distribution which is the sum of the implanted atom concentration distribution in the substrate for each ion implantation condition over the series of ion implantation processes;

35

40

a third processing unit for receiving the output of said second processing unit as a first input and one of conditions to be met by a desired atom concentration distribution as a second input to determine whether said first input matches to said second input or not and outputting a first output representing the decision and a second output representing a difference between said first input and said second input; and

45

50

a fourth processing unit for receiving the first and second outputs of said third processing unit as first and second inputs. Respectively to output the series of ion implantation conditions inputted to said first processing unit as a first output when the first output of said third processing unit is affirmative, and output a second output indicating a correction amount to

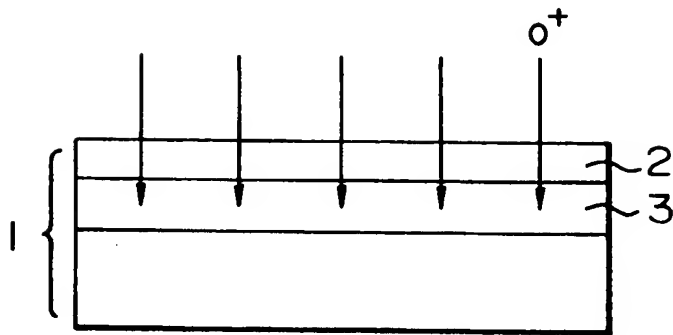
55

correct a selected one of the series of ion implantation conditions inputted to said first processing unit to decrease the second input when the first output of said third processing unit is negative.

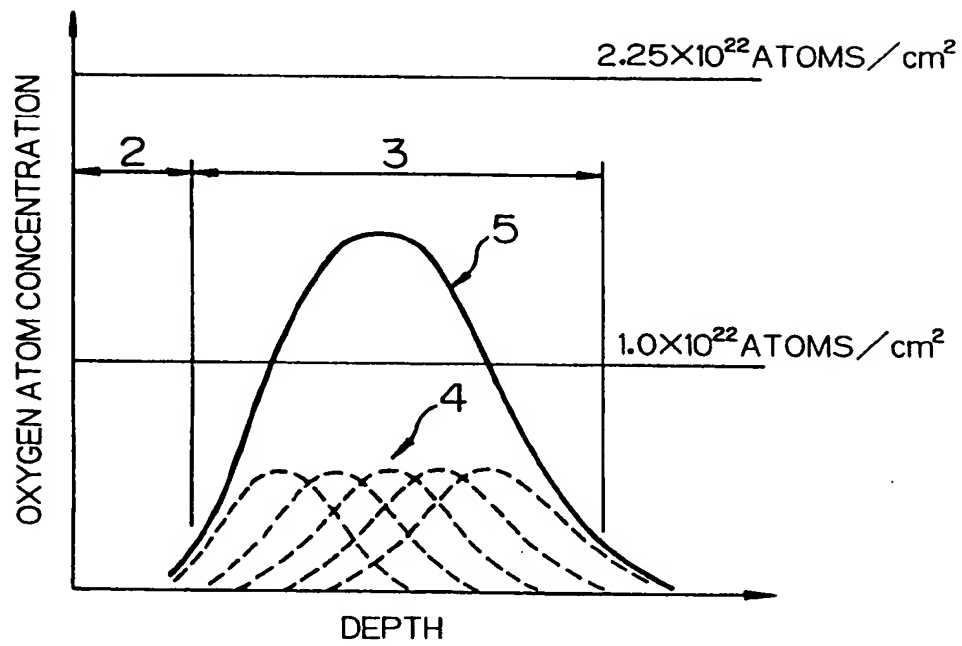
15. An apparatus for manufacturing a semiconductor substrate according to Claim 14 further comprising:

means for applying the first output of said fourth processing unit to a control unit of an ion implantation apparatus.

**FIG. 1A**



**FIG. 1B**



**FIG. 1C**

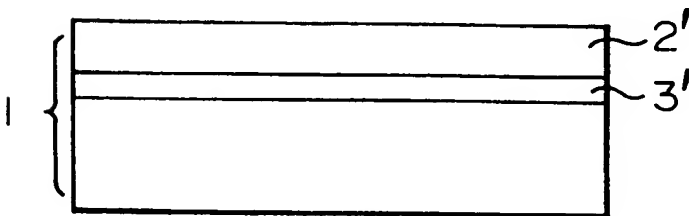


FIG. 2A

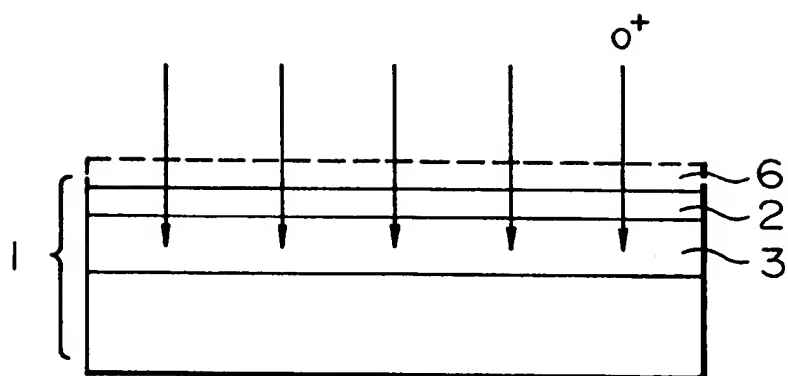


FIG. 2B

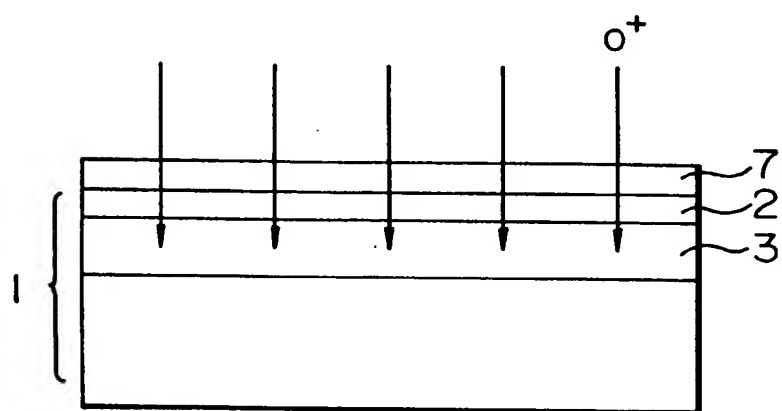


FIG. 3A

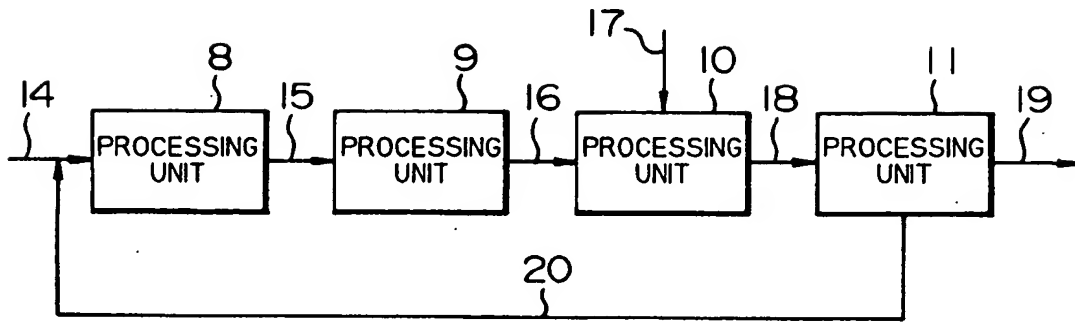
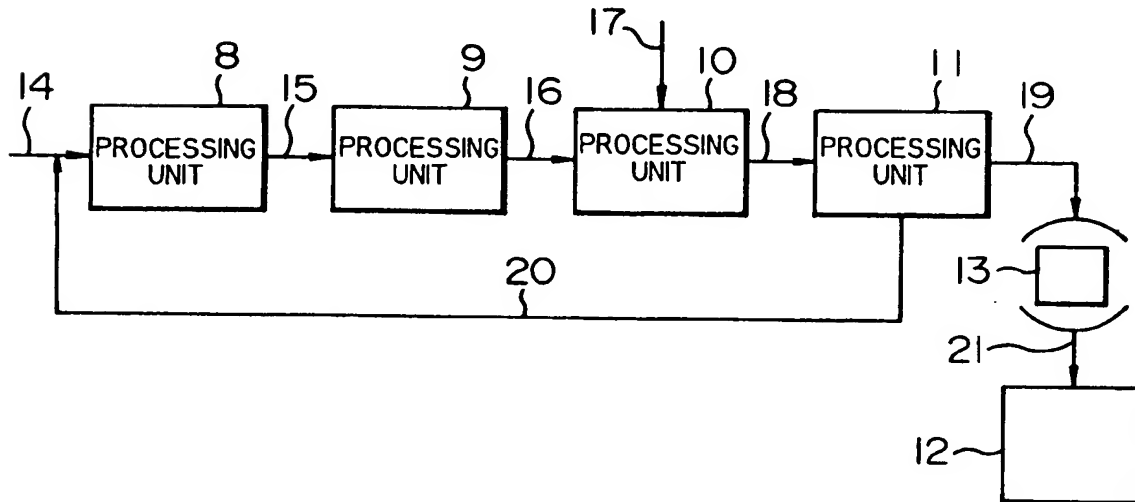
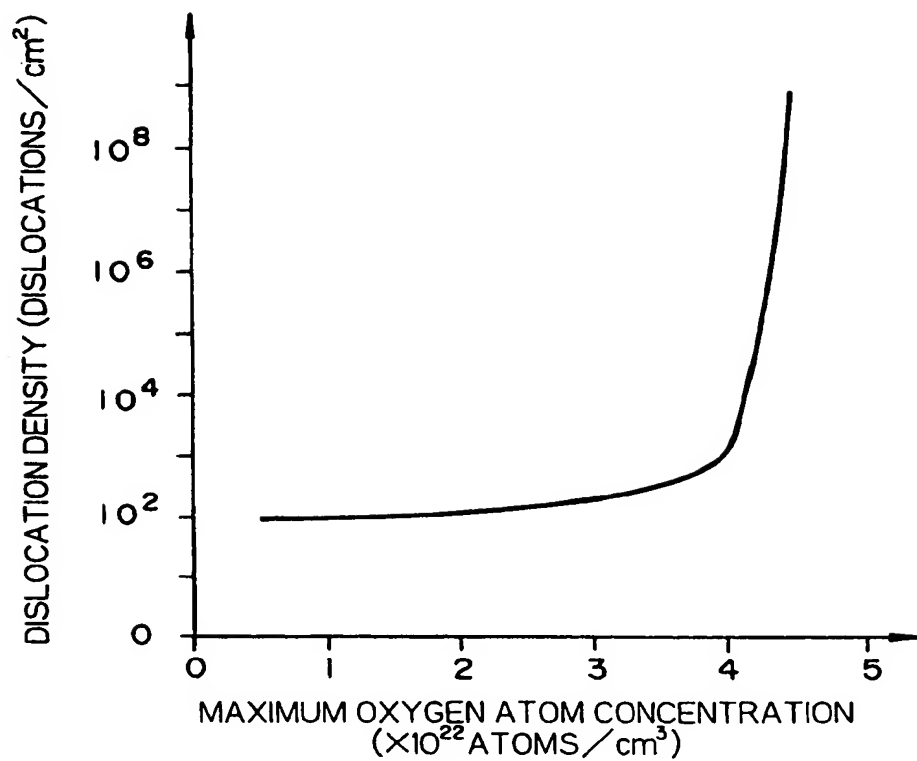
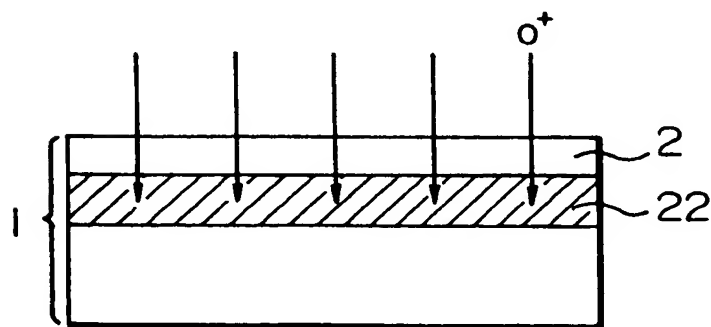
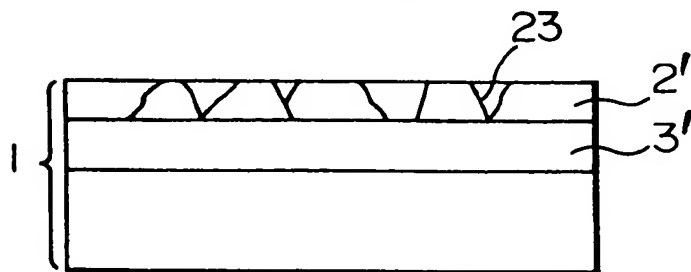


FIG. 3B





**FIG. 4A****FIG. 4B****FIG. 4C**

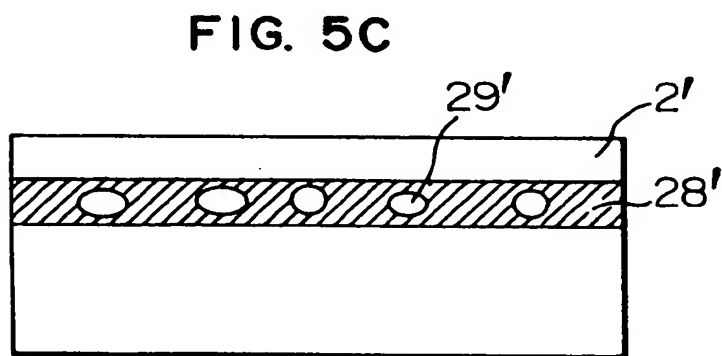
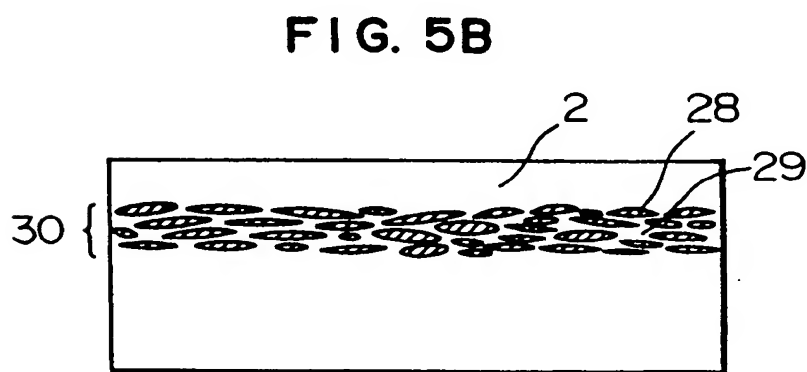
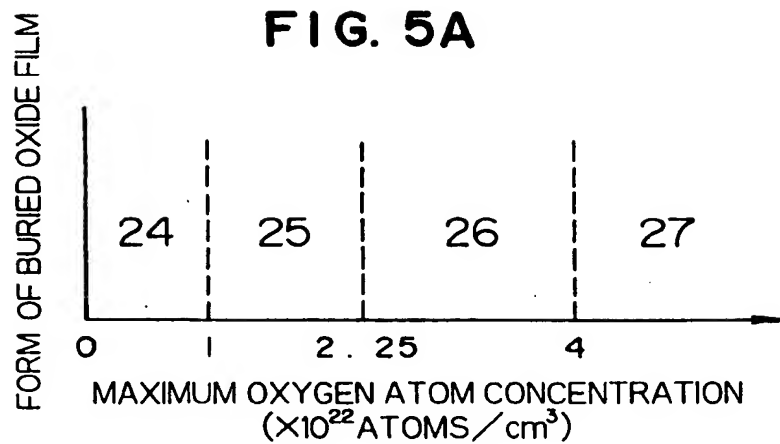


FIG. 6

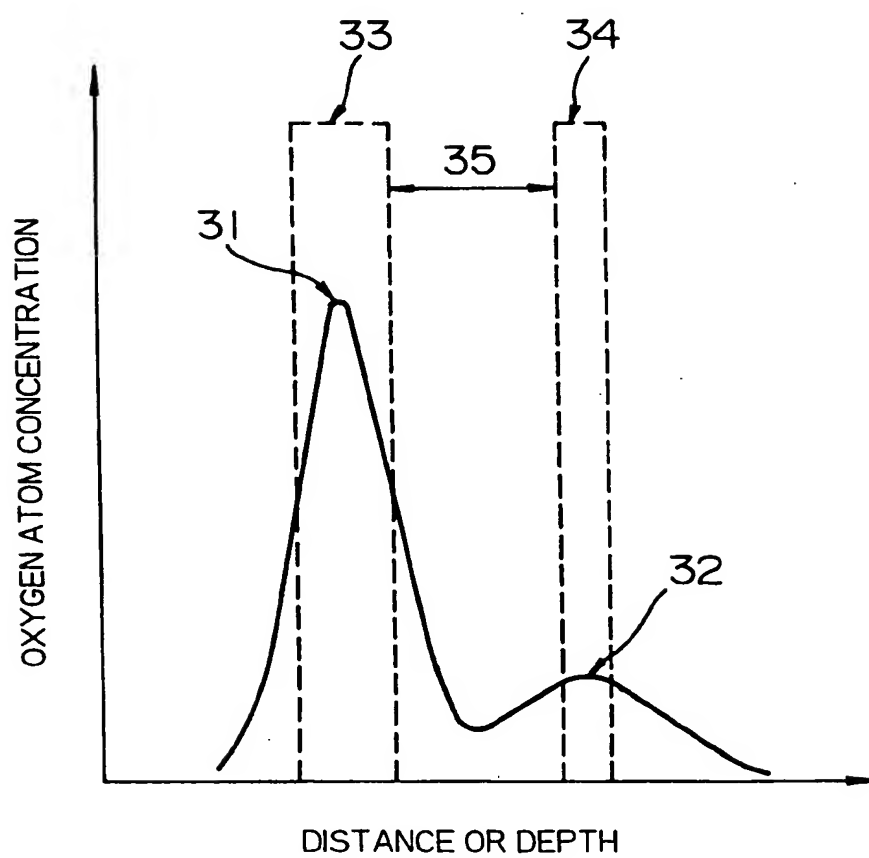


FIG. 7

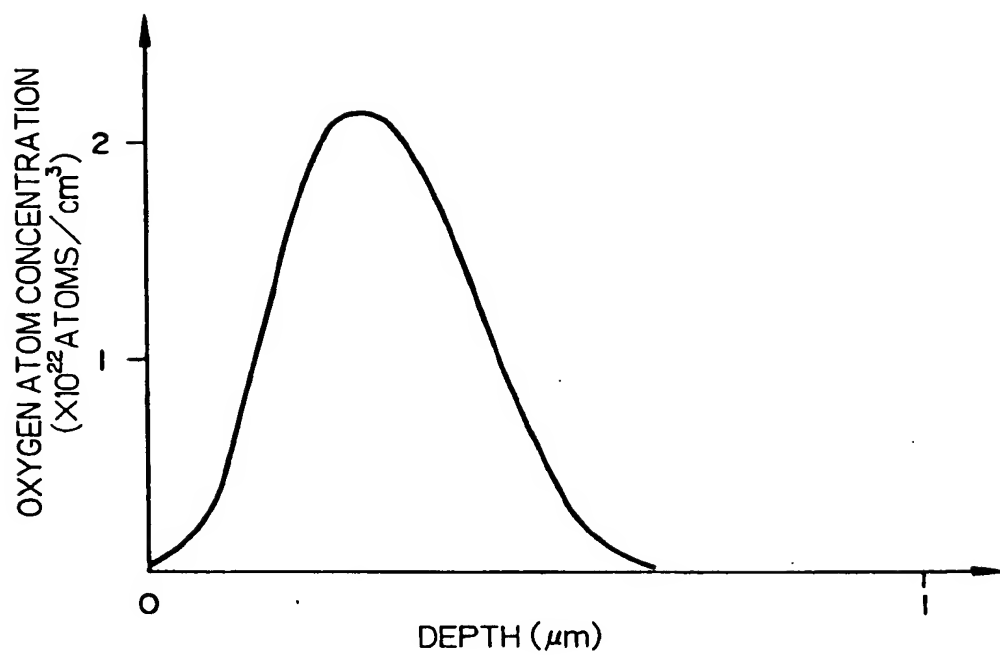
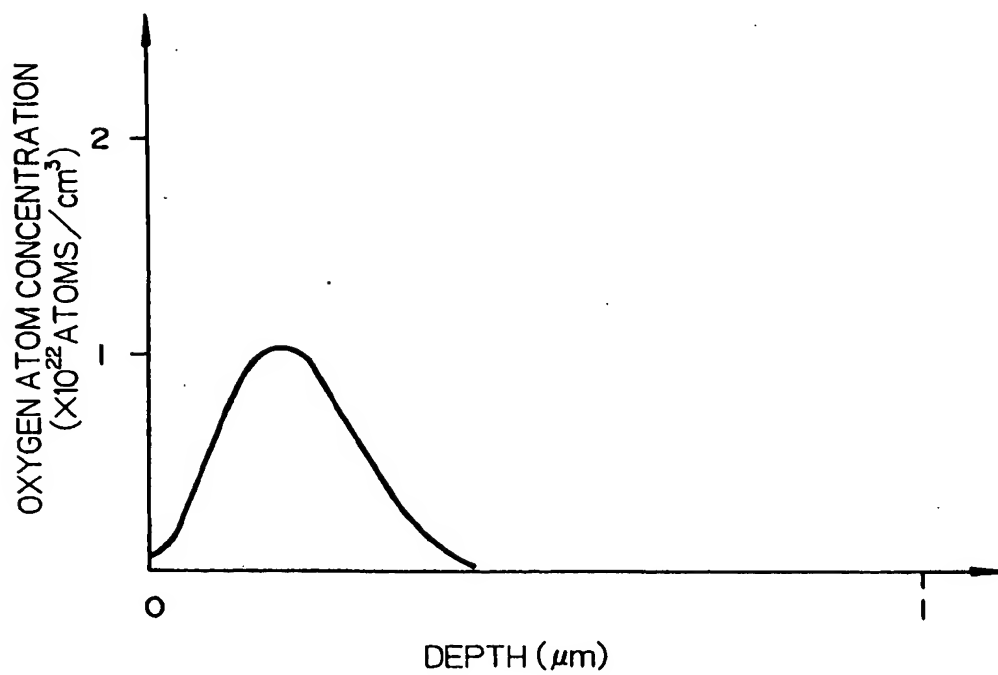
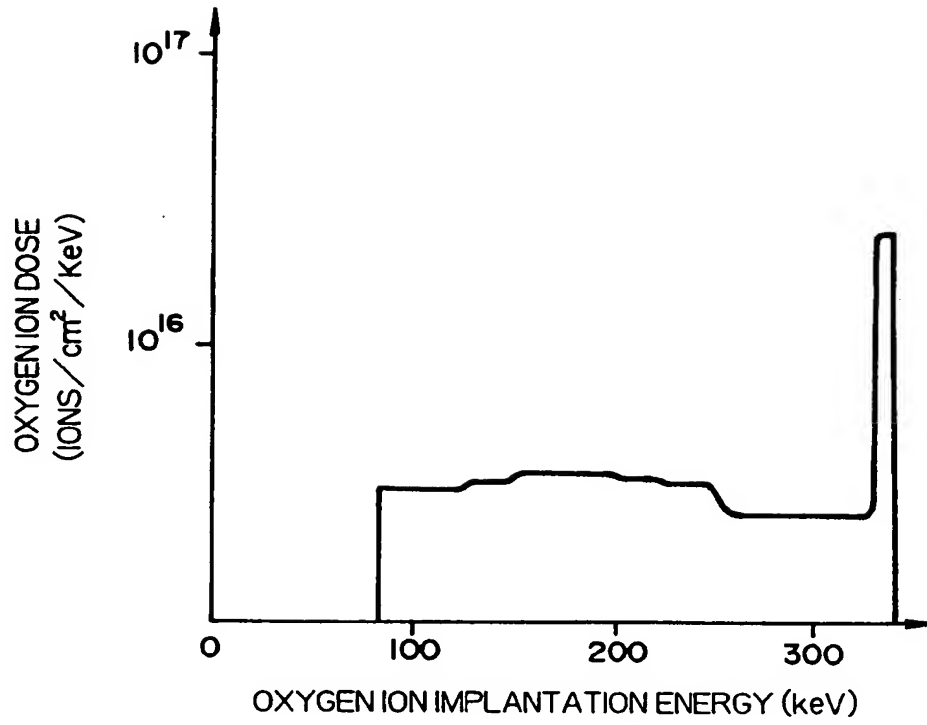


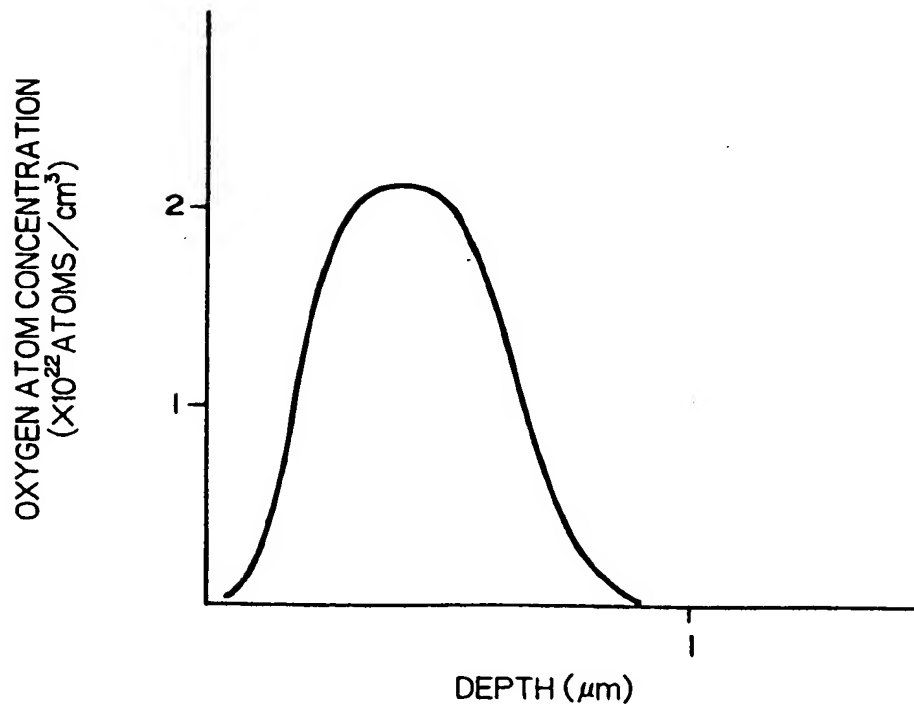
FIG. 8



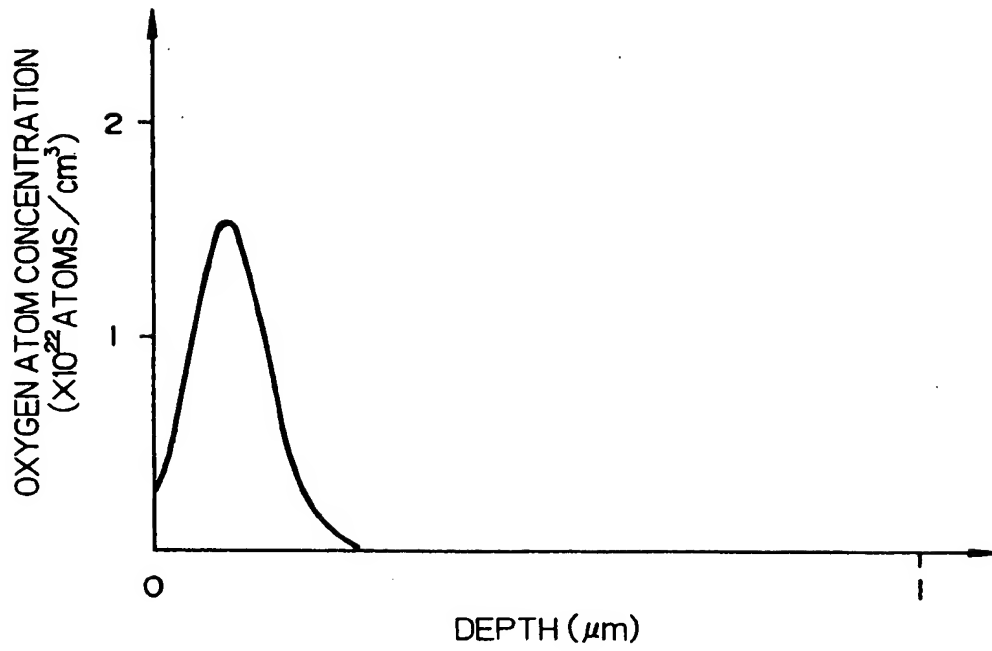
**FIG. 9A**



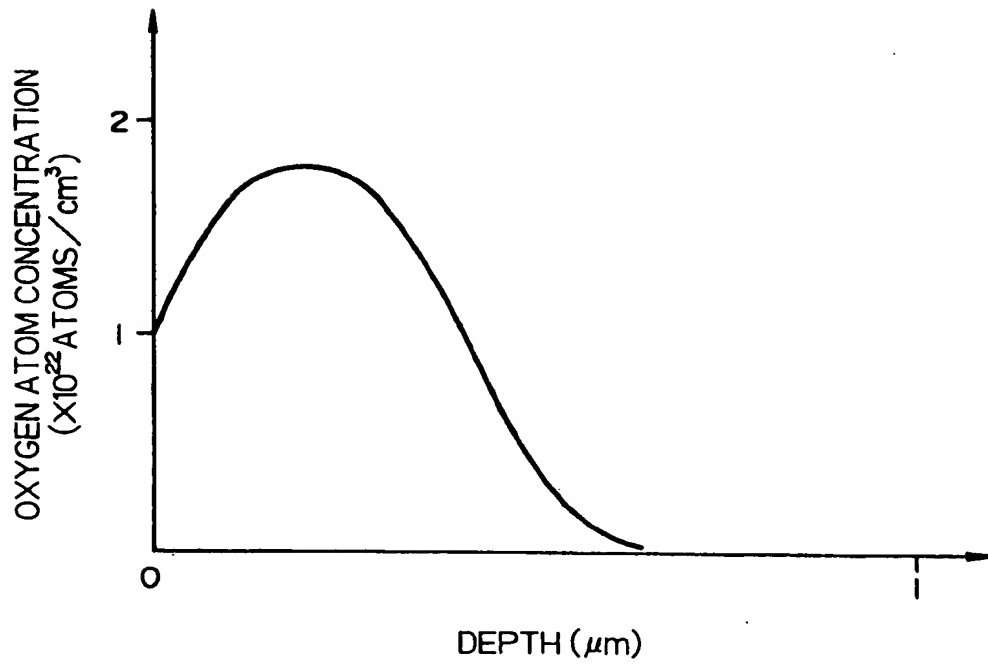
**FIG. 9B**



**FIG. 10**



**FIG. 11**





## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP94/02297

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl<sup>5</sup> H01L21/76, H01L21/265, H01J37/317

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl<sup>5</sup> H01L21/76, H01L21/265, H01J37/317

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1926 - 1994

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971 - 1994

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP, A, 63-9940 (Fujitsu Ltd.), January 16, 1988 (16. 01. 88),	1 - 4
Y	Lines 2 to 8, lower right column, page 2 (Family: none)	5 - 13
Y	JP, A, 4-249323 (Mitsubishi Electric Corp.), September 4, 1992 (04. 09. 92),	5, 7, 13
A	Line 3, column 4, page 3 to line 11, column 5, page 4 (Family: none)	6, 11, 12
Y	JP, A, 64-37835 (NEC Corp.), February 8, 1989 (08. 02. 89), Lines 5 to 13, upper right column, page 2 (Family: none)	5, 7
Y	JP, A, 2-54562 (Oki Electric Industry Co., Ltd.), February 23, 1990 (23. 02. 90), Line 15, upper right column to line 18, lower left column, page 3 (Family: none)	8, 9

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"Z" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

February 14, 1995 (14. 02. 95)

Date of mailing of the international search report

March 7, 1995 (07. 03. 95)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Facsimile No.

Authorized officer

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP94/02297

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP, A, 58-60556 (Fujitsu Ltd.), April 11, 1983 (11. 04. 83), Line 7, upper left column to line 2, upper right column, page 2 (Family: none)	8 5, 11, 12
A	JP, A, 2-284341 (Fuji Electric Co., Ltd.), November 21, 1990 (21. 11. 90), Line 9, lower left column, page 3 to line 14, upper left column, page 4 (Family: none)	14, 15
A	JP, A, 5-47342 (Nisshin Electric Co., Ltd.), February 26, 1993 (26. 02. 93), Line 19, column 8, page 5 to line 28, column 9, page 6 (Family: none)	14, 15

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1992)

(19) 日本国特許庁 (J P)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平7-201975

(43) 公開日 平成7年(1995)8月4日

(51) Int. Cl. <sup>6</sup>

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

H01L 21/76

21/265

27/12

E

H01L 21/76

R

21/265

J

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全12頁)

(21) 出願番号 特願平5-337894

(22) 出願日 平成5年(1993)12月28日

(71) 出願人 000006655

新日本製鐵株式会社

東京都千代田区大手町2丁目6番3号

(72) 発明者 日月 應治

神奈川県相模原市淵野辺5-10-1 新日

本製鐵株式会社エレクトロニクス研究所内

(72) 発明者 矢野 孝幸

山口県光市大字島田3434番地 新日本製鐵

株式会社光製鐵所内

(72) 発明者 浜口 功

山口県光市大字島田3434番地 新日本製鐵

株式会社光製鐵所内

(74) 代理人 弁理士 八田 幹雄

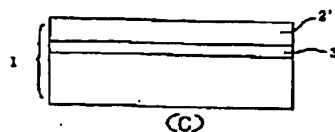
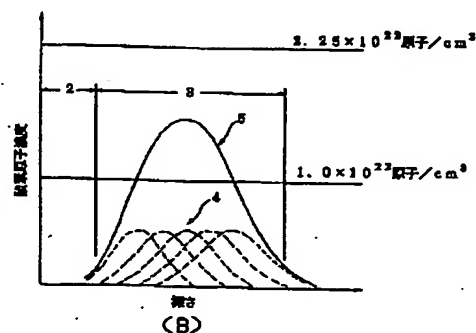
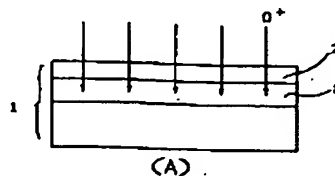
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体基板の製造方法および製造装置

(57) 【要約】

【目的】 本発明は、シリコン基板に酸素イオンを注入することにより厚さ90nm以上の連続した埋め込み酸化膜と転位の数が $10^3$ 個/cm<sup>2</sup>未満の単結晶シリコン層からなる高品質なSOI型半導体基板を製造する方法を提供する。

【構成】 一連の酸素イオン注入の逐一の平均注入深さと注入イオン量を連続的あるいは段階的に変え、酸素原子濃度分布が深さ方向には1つの極大値を有せしめ、一定深さ面内では均一にし、酸素原子濃度の最大値を好ましくは $2.25 \times 10^{23}$ 原子/cm<sup>3</sup>以下かつ $1.0 \times 10^{23}$ 原子/cm<sup>3</sup>以上とし、全酸素イオン注入量を得たい埋め込み酸化膜の厚さに $4.48 \times 10^{21}$ をかけた量にし、さらに、埋め込み酸化膜形成のために1300℃以上の温度の熱処理を酸素イオン注入が終了した後に行うことにより高品質なSOI半導体基板が製造できる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 シリコン基板にその主表面から酸素イオンを注入してSOI型の半導体基板を製造する方法において、該シリコン基板に注入された酸素原子の濃度の最大値が $4.0 \times 10^{12}$ 原子/cm<sup>3</sup>以下かつ $1.0 \times 10^{12}$ 原子/cm<sup>3</sup>以上となるように酸素イオンを注入することを特徴とする半導体基板の製造方法。

【請求項2】 シリコン基板に注入された酸素原子の濃度の最大値が $2.25 \times 10^{12}$ 原子/cm<sup>3</sup>以下かつ $1.0 \times 10^{12}$ 原子/cm<sup>3</sup>以上となるように酸素イオンを注入することを特徴とする請求項1に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項3】 酸素イオンの注入によって得られるシリコン基板中の酸素原子濃度の深さ方向の分布が、単一の極大値を有し、該極大値の前後で連続的に減少することを特徴とする請求項1または2に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項4】 酸素イオンの注入によって得られるシリコン基板中の酸素原子濃度の一定深さの面内における分布が均一であることを特徴とする請求項3に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項5】 逐一の酸素イオン注入の平均注入深さと該平均注入深さに対応する注入イオン量とを連続的あるいは段階的に変えて一連の酸素イオン注入をすることを特徴とする請求項1ないし4のいずれかに記載の半導体基板の製造方法。

【請求項6】 全酸素イオン注入量（単位はイオン/cm<sup>2</sup>）を得たい埋め込み酸化膜の厚さ（単位はcm）に $4.48 \times 10^{12}$ をかけた量にすることを特徴とする請求項1ないし5のいずれかに記載の半導体基板の製造方法。

【請求項7】 逐一の酸素イオン注入の平均注入深さをイオン注入エネルギーを変えることによって変えることを特徴とする請求項5に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項8】 逐一の酸素イオン注入の平均注入深さをシリコン基板の表面を除去することによって変えることを特徴とする請求項5に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項9】 逐一の酸素イオン注入の平均注入深さをシリコン基板の表面に膜を堆積することによって変えることを特徴とする請求項5に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項10】 シリコン基板の表面に堆積する膜の構成元素がシリコンあるいはシリコンと酸素であることを特徴とする請求項9に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項11】 逐一の酸素イオン注入の平均注入深さと注入イオン量に対応した個々の酸素原子濃度の深さ方向の分布を一連の酸素イオン注入について加算累積した酸素原子濃度の深さ方向の分布と予め決めた酸素原子濃度の深さ方向の分布とを比較し、両者が一致するように逐一の酸素イオン注入の平均注入深さとを注入イオン量

とを決めることを特徴とする請求項5に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項12】 逐一の酸素イオン注入の平均注入深さと注入イオン量に対応した個々の酸素原子濃度の深さ方向の分布を一連の酸素イオン注入について加算累積した酸素原子濃度の深さ方向の分布を請求項1、請求項2、請求項3、請求項4および請求項6が規定するところの酸素原子濃度ならびにその分布が満たすべき条件と比較し、該加算累積した酸素原子濃度の深さ方向の分布が該条件を満足するように逐一の酸素イオン注入の平均注入深さと注入イオン量とを決めることを特徴とする請求項5に記載の半導体基板の製造方法。

【請求項13】 酸素イオン注入が終了した後に埋め込み酸化膜形成のために1300℃以上の高温で熱処理を行なうことを特徴とする請求項1ないし9のいずれかに記載の半導体基板の製造方法。

【請求項14】 第1の演算装置が一連のイオン注入の逐一のイオン注入条件を入力とし、該逐一のイオン注入条件に対する基板中の注入原子濃度分布を出力とし、第2の演算装置が、第1の演算装置の出力を入力とし、逐一のイオン注入条件に対する基板中の注入原子濃度分布を一連のイオン注入について加算累積した注入原子濃度分布を出力とし、第3の演算装置が第2の演算装置の出力を第1の入力とし、得たい注入原子濃度分布あるいは請求項1、請求項2、請求項3、請求項4および請求項6が規定するところの注入原子濃度ならびにその分布が満たすべき条件のいずれかを第2の入力とし、第1の入力が第2の入力に一致するかあるいは満足するかの判定結果を第1の出力とし、第1の入力と第2の入力との差異を第2の出力とし、

第4の演算装置が第3の演算装置の第1の出力を第1入力とし、第3の演算装置の第2の出力を第2入力とし、決定した一連のイオン注入の逐一のイオン注入条件を第1の出力とし、第2の入力が小さくなるように修正した一連のイオン注入の逐一のイオン注入条件を第2の出力とし、第4の演算装置の第2の出力を第1の演算装置の入力とする、

上記記載の第1から第4の演算装置を有する請求項11および12に記載の半導体基板の製造方法を実現する半導体基板の製造装置。

【請求項15】 第4の演算装置の第1の出力をイオン注入装置の制御器の入力とすることを特徴とする請求項14に記載の半導体基板の製造装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、シリコン基板に酸素イオンを注入してシリコンオンインシュレータ（以下、SOIと記す）型の半導体基板を製造する方法に関するも

のである。

#### 【0002】

【従来の技術】半導体基板の内部にイオン注入により絶縁層を形成せしめることは特公昭49-39233号公報に開示された良く知られた技術である。従来、単結晶シリコン基板に酸素イオンを注入することにより基板内部に絶縁物であるシリコン酸化膜（以下、「埋め込み酸化膜」と呼ぶ。）を形成すると同時に、埋め込み酸化膜上に基板表面全面にわたって均一な厚さを有する単結晶シリコン層を形成する方法として以下に記載した方法がある。

【0003】特公昭62-12658号公報には、200℃以上の温度に保った単結晶シリコン基板内部に酸素を均一な絶縁層中の酸素濃度（ $4.5 \times 10^{13}$  個/cm<sup>3</sup>）の1.5倍以上の濃度となるようにイオン注入することにより、埋め込み酸化膜と表面の単結晶シリコン層との界面を急峻とする方法が開示されている。しかし、この方法には、表面の単結晶シリコン層中の転位が $10^6$  個/cm<sup>2</sup> 以上となる欠点がある。

【0004】特開昭62-188239号公報ならびに米国特許4,676,841には、シリコン基板に酸素イオンを、注入エネルギーが100ないし400keVの範囲で、注入量が $5 \times 10^{17}$  ないし $5 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> の範囲で注入し、少なくとも1300℃の温度で6時間ないし10分間、窒素雰囲気中で熱処理することにより、単結晶シリコン層と埋め込み酸化膜との境界に非化学量論的二酸化シリコンが存在しない鋭い境界を得る方法が開示されている。しかし、この方法には、表面の単結晶シリコン層中の転位が $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以上となったり、また、連続な埋め込み酸化膜ができなかったりするという欠点がある。

【0005】特開昭64-1744号公報には、多数の連続する酸素または窒素イオンの注入がシリコン基板に、同じエネルギーで、 $1.5 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以下の量で行われ、各注入後に800℃以上、基板の溶融温度以下の高温で基板をアニールし、それぞれ酸素または窒素の埋め込み絶縁膜を形成する方法が開示されている。しかしながら、この方法では、表面の単結晶シリコン層中の転位が $10^6$  個/cm<sup>2</sup> 以下にはなるが、 $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以下とはならないという欠点がある。

【0006】特開平2-191357号公報には、予めシリコンイオンを酸素イオンの濃度が $10^{11}$  個/cm<sup>3</sup> となる深さ（2つあるうちの浅い方）に $10^{18}$  個/cm<sup>3</sup> 以上注入して非晶質化した後に、酸素イオンを注入することにより、酸素イオン注入におけるチャネリングを防ぐとともに、空孔や過剰酸素を注入シリコンによって消滅させることによって空孔や過剰酸素によって誘起される表面シリコン層中の結晶欠陥の発生を防ぐ方法が開示されている。しかしながら、この方法では、埋め込み酸化膜の形成反応過程で発生する格子間のシリコン原子

と過剰な注入シリコン原子とによってかえって表面の単結晶シリコン層中の転位が増加するという欠点がある。

【0007】特開平3-240230号公報には、シリコン基板に、第1の注入エネルギーで酸素イオンを注入した後、第1の熱処理、具体的にはAr雰囲気中で、1320℃、6時間の熱処理を施すことにより第1の埋め込み酸化膜を形成し、引き続き、第1の注入エネルギーより低い第2の注入エネルギーで第1の注入量より少ない酸素イオンを注入した後、第1の熱処理と同様の第2の熱処理を施すことにより第1の埋め込み酸化膜の上に重ねて第2の埋め込み酸化膜を形成することにより、酸素イオンの注入量を減らして結晶欠陥の発生を防ぎ、かつ、所定の膜厚の埋め込み酸化膜の上に薄い表面単結晶シリコン層を得る方法が開示されている。しかしながら、この方法では、所定の膜厚の埋め込み酸化膜を得るための酸素イオン注入量を減らすことはできず、また表面の単結晶シリコン層中の転位密度も $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以上となる。

【0008】特開平4-249323号公報には、シリコン基板の主表面に、該シリコン基板の主表面から下方の位置で最大値となるような酸素濃度分布を与える第1の高エネルギーで第1の酸素イオンを注入し、その後該シリコン基板を熱処理して該シリコン基板中に埋め込み酸化膜を形成し、次に該シリコン基板の主表面に、該埋め込み酸化膜とその上に存在する表面シリコン層との界面付近で最大値となるような酸素濃度分布を与える第2の高エネルギーで第2の酸素イオン注入をし、その後、該シリコン基板を熱処理することにより、埋め込み酸化膜と表面の単結晶シリコン層との界面を平坦にする方法が開示されている。しかしながら、この方法では、表面の単結晶半導体シリコン層中の転位が $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以上となる欠点がある。

【0009】特開平4-264724号公報には、シリコン基板に酸素イオンを加速エネルギー150keV以上200keV以下で注入量 $0.25 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以上 $0.50 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以下または $0.80 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以上 $1.30 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以下を注入し、引き続き1300℃以上の高温で熱処理することにより、表面の単結晶シリコン層中の転位が $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以下となる方法が開示されている。しかしながら、J・Mater. Res.、Vol. 8 (1993)、pp. 523-534にS. Nakashimaらが開示しているように、この方法には、次に挙げる欠点がある。酸素イオン注入量が $0.3 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以下の場合には必ずしも連続な埋め込み酸化膜が形成されず、かつ、埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン層中に $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以上の転位が発生する。この転位はSOI構造上に作った半導体デバイスの電流リークなどの原因となって、半導体デバイスの特性を劣化させる。また、酸素イオン注入量が0、

$4 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以上  $1.2 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以下の場合にはシリコン粒を包含した不完全なシリコン酸化膜となる。シリコン粒を包含した埋め込み酸化膜は絶縁破壊耐圧が低く、SOI構造の上に作られた半導体デバイスの特性を劣化させることになる。また、酸素イオン注入量が  $1.2 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> を越える場合には埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン層中に  $10^3 \sim 10^4$  個/cm<sup>2</sup> の転位が発生する。酸素イオン注入量が  $0.3 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以上  $0.4 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> 以下の場合には、埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン層中の転位は  $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以下となり、かつ、シリコン粒が包含されない連続な埋め込み酸化膜が得られるが、この場合には、埋め込み酸化膜の厚さがおよそ70から90nmに限定されるという欠点がある。このことに関連して、J. Appl. Phys.、Vol. 70 (1991)、pp. 3605-3612にY. Liらが連続な埋め込み酸化膜が形成できる臨界酸素イオン注入量を酸素イオンの飛程の関数として議論しており、また、Maer. Sci. Eng.、B12 (1992)、pp. 41-45にA. K. Robinsonらがシリコン粒を包含しない埋め込み酸化膜が得られ、かつ転位が少ない単結晶シリコン層が得られる酸素イオン注入量について注入エネルギーが70keVのときは  $0.33 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> であると開示している。

【0010】特開平4-737号公報には、膜厚が400nm程度に十分厚い埋め込み酸化膜上に膜厚が80nm程度に十分薄いシリコン層を簡単に得る方法として、シリコン基板上にシリコン酸化膜あるいはシリコン窒化膜からなるキャップ膜を形成し、次いで、そのチャップ膜を介してシリコン基板内部に酸素イオンを注入し、次いで、熱処理を施すことにより埋め込み酸化膜を形成し、熱処理の前あるいは後にチャップ膜を除去する方法が開示されている。しかし、この方法によって、常に連続で均一な埋め込み酸化膜や転位の少ない単結晶シリコン層が得られる訳ではない。

【0011】米国特許5,080,730には、シリコン基板に酸素あるいは窒素をイオン注入する際に、イオンビームによるシリコン基板に表面の浸食を補償するように注入エネルギーを低減させることにより、シリコン基板の同じ位置にイオンが注入されるようにして幅の狭い埋め込み酸化膜を得る方法と、イオンビームによるシリコン基板の表面の浸食を補償するように注入エネルギーを増加させることにより幅の広い埋め込み絶縁膜を得る方法が開示されている。しかし、この方法によっても常に連続で均一な任意の厚さの埋め込み絶縁膜と転位の少ない単結晶シリコン層が得られるわけではない。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】本発明が解決しようとする課題は、シリコン基板に酸素イオンを注入してSO

I型の半導体基板を製造する方法において、絶縁物である埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン層中の転位の数が  $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 未満となり、かつ、シリコン粒が包含されない連続した埋め込み酸化膜が得られる製造方法を提供することにある。さらに、90nm以上の厚さを有する該埋め込み酸化膜が得られる製造方法を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明が提供する解決手段を図1A、B、Cと図2A、Bで説明する。本発明は、図1Aに示すようにシリコン基板1の主表面から酸素イオンを注入し、その後、熱処理を施すことによって図1Cに示すようにイオン注入により多数の結晶欠陥が生じた表面のシリコン層2を結晶欠陥の少ない単結晶シリコン層2'に変え、また、酸素イオン注入領域3に注入した酸素原子と基板のシリコン原子とを反応せしめて連続で均質なシリコン酸化膜すなわち埋め込み酸化膜3'を形成する際の注入条件などを以下のようにすることを特徴としている。すなわち、

(1) 図1Bに示すように一連の酸素イオンの注入によって得られる酸素原子濃度の深さ方向の分布5が、単一の極大値を有し、極大値の前後で連続的に減少するように、逐一の酸素イオン注入4の平均注入深さと注入イオン量とを連続的あるいは段階的に変えて注入する。

【0014】(2) 酸素原子濃度分布5の極大値は、これは最大値でもあるが、 $4.0 \times 10^{18}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ  $1.0 \times 10^{18}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上にし、好ましくは  $2.25 \times 10^{18}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ  $1.0 \times 10^{18}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上にし、一連の酸素イオン注入の全注入量(単位はイオン/cm<sup>2</sup>)は得たい埋め込み酸化膜の厚さ(単位はcm)に  $4.48 \times 10^{12}$  をかけた量にする。

【0015】(3) 酸素イオンの注入深さを変えることを、注入エネルギーを変えること、図2Aに示すようにシリコン基板1の表面6を除去すること、図2Bに示すようにシリコン基板1の表面に膜7を堆積することによって行なう。

【0016】(4) 一連の酸素イオン注入が終了した後に化学量論的な埋め込み酸化膜3'と結晶欠陥の少ない単結晶シリコン層2'を形成するために1300℃以上の高温で熱処理を行なう。

【0017】

【作用】シリコン基板に酸素イオンを注入することにより基板表面全面にわたって均一な厚さを有する単結晶シリコン層を絶縁物である埋め込み酸化膜上に形成する方法において、埋め込み酸化膜上の半導体シリコン層中の転位の密度と酸素イオンの注入量との関係をS. NakashimaらがJ. Mater. Res.、Vol. 8 (1993)、pp. 523-534に報告している。本発明者が埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン層中



の転位の発生について具に調べた結果、単結晶シリコン層中の転位の数は必ずしも酸素イオンの注入量に依存しているのではなく、本質的にはシリコン基板内に注入された酸素原子の最大濃度に依存することが明らかとなった。シリコン基板中に酸素イオンの注入を続けていくと、シリコン基板中の酸素原子濃度が増加し、酸素原子濃度が $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> を越えると、図4Bに示すようにSiO<sub>2</sub> 相にシリコンがミクロに混合した非化学量論的なシリコン酸化膜22の形成が認められ、さらに酸素原子濃度が $4.48 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> に達すると化学量論的なシリコン酸化膜が形成される。シリコン基板中に非化学量論的シリコン酸化膜22が形成された後にさらに酸素イオンを注入すると熱処理後の埋め込み酸化膜3'上の単結晶シリコン層2'中の転位23の密度が急速に増加することが明らかになったのである。転位の増加は、化学量論的なシリコン酸化膜の形成後の酸素イオン注入によっても同様に認められる。図4Aにシリコン基板内部の注入した酸素原子濃度の最大値と転位密度との関係を示した。酸素原子濃度が $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下の場合、すなわち、酸素イオン注入中に非化学量論的シリコン酸化膜の形成も認められない場合には転位密度は $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 未満であり、反対に酸素原子濃度が $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> を越える場合、すなわち、非化学量論的シリコン酸化膜の形成あるいは化学量論的シリコン酸化膜の形成が認められる場合には、転位密度は $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以上である。

【0018】複数回に分けて酸素イオン注入と熱処理を繰り返すような場合に、ある回数目の酸素イオン注入後にシリコン基板内部の酸素原子濃度が $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> を越えていなくても、次の熱処理中の酸素原子の移動によって熱処理後の酸素原子濃度が $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> を越える場合がある。そのような場合に次の回数目の酸素イオン注入を行なうと埋め込み酸化膜上の半導体シリコン膜中の転位密度は $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以上となる。したがって、一連の酸素イオン注入の途中で埋め込み酸化膜とその上の単結晶シリコン層とを形成するための熱処理を施すことは避けるべきである。埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン層中の転位密度を $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 未満とするために、本発明では、酸素イオンをシリコン基板に注入している途中において、シリコン基板中の酸素原子濃度の最大値を $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下に保ち、かつ、埋め込み酸化膜とその上の単結晶シリコンとを形成するための1300℃以上の熱処理を一連の酸素イオン注入が終了した後に行なう。

【0019】シリコン基板に酸素イオンを注入することにより引き続いて該シリコン基板に熱処理を施すことによって注入した酸素原子と基板のシリコン原子とが反応して形成される埋め込み酸化膜の形態とイオン注入後の酸素原子濃度との関係を具に調べた結果、図5Aに示すよう

に埋め込み酸化膜の形態が酸素原子濃度の最大値に依存することが明らかとなった。酸素原子濃度の最大値が $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> を越える範囲27では均一な連続した埋め込み酸化膜あるいは上下の単結晶シリコン基板との界面近傍にわずかなシリコン粒子を包含する連続した埋め込み酸化膜が形成する。酸素原子濃度の最大値が $2.25 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> より多くかつ $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下である範囲26ではシリコン粒子を包含した埋め込み酸化膜が形成する。また、酸素原子濃度の最大値が $2.25 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ $1.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上である範囲25では均一な連続した埋め込み酸化膜が形成する。酸素原子濃度の最大値が $1.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 未満である範囲24では、不連続な埋め込み酸化膜が形成する。イオン注入した酸素原子濃度の最大値が $2.25 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> を越えるような場合に、酸素原子濃度が $2.25 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> より多くかつ $4.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下である領域は、オージェ電子分光分析像でみると、図5Bに示すように、明瞭にSiO<sub>2</sub> に富んだ領域28とSiに富んだ領域29とがミクロに混合したものからなっており、このような混合層30を1300℃以上の温度で熱処理すると、Siに富んだ領域29に存在する酸素原子がSiO<sub>2</sub> に富んだ領域28に取り込まれて、SiO<sub>2</sub> に富んだ領域28を中心にして埋め込み酸化膜28'が成長する一方で、Siに富んだ領域29は酸素原子濃度が固溶度程度になったシリコン粒子29'となって埋め込み酸化膜28'に囲まれて残る。シリコン粒子の大きさが十分に小さい場合には、高温の熱処理を十分長く行なうことによりシリコン粒子は埋め込み酸化膜中に固溶・拡散して消滅するが、通常の場合はシリコン粒子29'は残存する。イオン注入した酸素原子濃度の最大値が $2.25 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ $1.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上である場合には、酸素イオンを注入した領域はオージェ電子分光分析像でもSiO<sub>2</sub> に富んだ領域とSiに富んだ領域との区別がほとんど認められない層となっており、この層を1300℃以上の温度で熱処理するとシリコン粒子を包含しない埋め込み酸化膜が得られる。酸素原子濃度の最大値が $1.0 \times 10^{12}$  原子/cm<sup>3</sup> 未満の場合には、1300℃以上の温度の熱処理によって化学量論的な埋め込み酸化膜が形成する過程において、SiO<sub>2</sub> 析出物の大きさの数倍の大きさの隣接領域から酸素原子を集めなければならない。1300℃以上の温度で安定なSiO<sub>2</sub> 析出物のサイズは数10nm以上であることから、深さ方向の隣接領域のみから酸素原子を集めただけでは安定なサイズにならないため、横方向の隣接領域からも酸素原子を集めなければならないことがある。このような場合には、酸素原子を取られた横方向の隣接領域はシリコン層として残るので、SiO<sub>2</sub> 析出物は連続した埋め込み酸化膜に成長できない。したがって、シリコン粒子を

包含しない連続した埋め込み酸化膜を得るため、本発明では、注入した酸素原子濃度の最大値を $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ $1.0 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上とする。

【0020】イオン注入した酸素原子濃度の最大値が $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ $1.0 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上である場合においても、酸素原子濃度の深さ方向の分布および横方向の分布に複数のピークを有する場合には、熱処理を施すことによって、シリコン粒子を包含した埋め込み酸化膜あるいは不連続な埋め込み酸化膜を形成する場合がある。これを図6で説明する。図6中で実線は、酸素イオン注入直後のシリコン基板中の酸素原子濃度分布を示し、点線は1300℃以上の温度で熱処理を施した後のシリコン基板中の酸素原子濃度分布を示す。シリコン基板内に固溶度を越えて存在する酸素原子は熱処理によって容易にシリコン酸化物として析出するが、酸素原子濃度が周囲より高い点、すなわち、酸素原子濃度が極大ピークをとる点31、32から優先的に析出、そして成長する。析出物の成長が進み、析出物の周囲のシリコン基板中の酸素原子濃度が固溶度程度まで減少すると、熱処理温度で決まる臨界サイズ以下の小さい析出物は再固溶し、臨界サイズ以上の大きな析出物に酸素原子が取り込まれていく。臨界サイズ以上の析出物が複数残る場合には、析出物の領域33と析出物の領域34の間に酸素原子濃度が固溶度程度に減少したシリコン層の領域35が残るために連続な埋め込み酸化物が形成されないことがある。したがって、均一な深さに一様でかつ連続した埋め込み酸化膜を形成するためには、イオン注入した酸素原子濃度の深さ方向の分布が単一の極大ピークを有し、かつ、該極大ピークの前後で連続的に減少し、かつ、横方向の分布すなわち深さ一定の面内における分布が一様であることが望ましい。

【0021】次に、連続な埋め込み酸化膜の膜厚を増やす方法について説明する。埋め込み酸化膜の膜厚（単位はcm）は単位面積当たりの酸素イオン注入量（単位はイオン/cm<sup>2</sup>）を $4.48 \times 10^{11}$  で除した値にほぼ等しくなるので、埋め込み酸化膜の厚さを増やすには酸素イオン注入量を増やせば良い。しかしながら、従来技術で行われているように、酸素イオンの注入エネルギーを固定して注入量を増やしていく場合には、James F. Gibbons, William S. Johnson, Steven W. Mylroie 著 "PROJECTED RANGE STATISTICS" (Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. 発行) 22頁(4.2)式に示されているように、注入されたイオンの濃度の最大値はおおよそ $0.4\phi/\sigma$ （ここで、 $\phi$ はイオン注入量、 $\sigma$ はイオン注入深さの標準偏差である。）となるので、ある注入量以上では酸素原子の最大濃度が $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> を越えてしまう。例えば、550℃に保ったシリコン基板に酸素イオンをエネルギー200keVで注入する場合、注入した酸素原子濃度の最

大値が $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> に到達する酸素イオン注入量はおよそ $5 \times 10^{17}$  イオン/cm<sup>2</sup> であり、このとき、熱処理によって得られる埋め込み酸化膜の厚さはおよそ112nmである。酸素原子の最大濃度が $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> を越えた場合は、上で説明したように、埋め込み酸化膜はシリコン粒子を包含した膜になってしまうので、単純には酸素イオン注入量を増やせない。酸素原子濃度の最大値を $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ $1.0 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上の範囲に保ちながら酸素イオン注入量を増やす本発明の方法を図1で説明する。図1中の点線4は平均注入深さが異なる個々の注入に対応した酸素原子濃度の深さ方向の分布を示し、実線5は個々の注入を加算累積した酸素原子濃度の深さ方向の分布を示す。このように、平均注入深さを段階的あるいは連続的に変えながら一連の酸素イオン注入を行ない、その際に、加算累積した酸素原子濃度の最大値が上に述べた範囲に入るように、かつ、全酸素イオン注入量が所定の膜厚の埋め込み酸化膜を得るのに必要な注入量になるように逐一の平均注入深さに対応する注入イオン量を制御する。平均注入深さを変えながらイオン注入することによって深さ方向に幅広く注入でき、低い酸素原子濃度の最大値でもって所定の膜厚の埋め込み酸化膜を得るに必要な注入量を確保することが可能となる。これを実施する場合、上に記述したように、加算累積した酸素原子濃度の深さ方向の分布が単一の極大ピークを有し、かつ、横方向の分布は一様であるようにすることが望ましい。

【0022】酸素イオンを注入する深さ方向の位置を変える方法としては、酸素イオンの注入エネルギーを変える方法、図2Aに示すようにシリコン基板の表面のシリコン層6を除去しながら注入する方法、図2Bに示すようにシリコン基板の表面に膜7を堆積しながら注入する方法、あるいはこれらの方法を組み合わせた方法、などを用いることができる。シリコン基板の表面のシリコン層6を除去する具体的な方法としては、砥粒や水酸化カリウム水溶液などを用いた研磨あるいは研削、塩素ガスや六フッ化硫黄ガスや四フッ化炭素ガスなどを用いたプラズマエッチング、アンモニアと過酸化水素の混合水溶液や硝酸とフッ酸の混合水溶液や水酸化カリウム水溶液などを用いた湿式エッチングなどが適している。シリコン基板の表面に堆積する膜7の構成元素は、酸素イオンが膜7を通してシリコン基板中に注入される過程でノックオン現象によって膜7の構成元素がシリコン基板内に打ち込まれるため、シリコン基板上に作り込まれる半導体電子デバイスの動作特性に悪影響を及ぼさない元素であることが望ましい。金属元素などは半導体電子デバイスの動作に悪影響を及ぼす深い準位をシリコン基板中に形成するので好ましくない。また、炭素や窒素はシリコン基板中に結晶欠陥を発生させやすいので好ましくない。膜7の望ましい構成元素はシリコンと酸素であり、

膜7はシリコン膜やシリコン酸化膜あるいはこれらの複合膜であることが望ましい。

【0023】一連の酸素イオン注入における逐一の平均注入深さと注入イオン量とを決める具体的な方法を図3Aで説明する。演算装置8に、酸素イオンの注入エネルギー、注入イオン量ならびに表面シリコン層の除去量を10入力すると、その条件でシリコン基板に酸素イオンを注入したときのシリコン基板中の酸素原子濃度分布15が出力されるプログラムを組み込む。また、演算装置8には、シリコン表面に堆積した膜の物質名ならびに膜厚と酸素イオンの注入エネルギーならびに注入イオン量を10入力すると、その膜の上からシリコン基板にその条件で酸素イオンを注入した時のシリコン基板中の酸素原子濃度分布15が出力されるプログラムも組み込む。演算装置8に組み込まれたプログラムでは、酸素イオン注入中にシリコン表面やシリコン表面に堆積した膜がイオンビームによって、浸食消耗する影響、シリコン基板の結晶方位とイオンビームの注入方向によって生じるチャンネルング、イオン注入中のシリコン基板温度の影響も考慮される。演算装置8において、酸素注入エネルギーや注入イオン量などの一連の酸素イオン注入における逐一注入条件14の入力からシリコン基板中の酸素原子濃度分布15を出力する方法としては、予め実験や計算で求めて記憶させておいたものを取り出して出力する方法でも、またその場で計算により求めて出力する方法でも良い。演算装置9には、一連の酸素イオン注入条件に対して演算装置8から出力される個々の酸素原子濃度分布15を入力すると、それらを加算累積した酸素原子濃度分布16を出力するプログラムを組み込む。演算装置10には、演算装置9から出力される一連の酸素イオン注入について加算累積された酸素原子濃度分布16と得たい酸素原子濃度分布17とを入力すると、その両者が一致しているか否かを比較判定して、その判定結果ならびに両者の差18を出力するプログラムを組み込む。演算装置11には、演算装置10から出力される判定結果と加算累積された酸素原子濃度分布と得たい酸素原子濃度分布との差18を入力すると、判定結果が一致の場合は、その時の一連の酸素イオン注入条件19、すなわち、注入エネルギー、注入イオン量、シリコン基板表面に堆積する膜の物質名と膜厚、あるいはシリコン表面の除去量などが出力され、判定が不合格の場合は、加算累積された酸素原子濃度分布16と得たい酸素原子濃度分布17との差が縮小する方向に修正した一連の酸素イオン注入条件20を出力するプログラムを組み込む。演算装置11から出力される修正した一連の酸素イオン注入条件20は演算装置8の入力としてフィードバックする。演算装置8～11を接続し、演算装置8に一連の酸素イオン注入条件14の初期値を入力し、また演算装置10に得たい酸素原子濃度分布17を入力すると、演算装置11から最適な一連の酸素イオン注入条件19が決定されて出

力される。

【0024】上記の説明では、演算装置10の1つの入力を得たい酸素原子濃度分布17としたが、これに代えて、本発明が規定するところの酸素原子濃度分布が満足すべき条件を入力としても良い。この場合、演算装置10には、演算装置9から出力される一連の酸素イオン注入について加算累積された酸素原子濃度分布16と本発明が規定するところの酸素原子濃度分布が満足すべき条件17とを入力すると、加算累積された酸素原子濃度分布16が本発明が規定するところの酸素原子濃度分布が満足すべき条件17を満たしているか否かを比較判定して、その判定結果と両者の差18を出力するプログラムを組み込む。これに伴い、演算装置11には、演算装置10から出力される判定結果と加算累積された原子濃度分布と本発明が規定するところの酸素原子濃度分布が満足すべき条件との差18を入力すると、判定結果が一致の場合は、決定された一連の酸素イオン注入における逐一の注入条件19を、判定が不合格の場合は、加算累積された酸素原子濃度分布16と本発明が規定するところの酸素原子濃度分布が満足すべき条件17との差が縮小する方向に修正した一連の酸素イオン注入条件20を出力するプログラムを組み込む。以上の説明では、演算装置8～11は別個のものとして説明したが、適当に共通化したり、さらに分割化することもできる。

【0025】注入エネルギーによって注入深さを変える場合には、図3Bに示すように、図3Aの演算装置の出力19を酸素イオン注入装置の制御器12に入力することによって、酸素イオン注入装置の効率的な運転ができる。必要な場合には、演算装置の出力19と酸素イオン注入装置の制御器の入力21との間に変換器13を介して、注入エネルギーをイオンビームの加速電圧に、注入イオン量をイオンビーム電流と注入時間に変換することも良い。

【0026】

【実施例】

実施例1

シリコン基板に全注入量  $6.72 \times 10^{17}$  イオン/cm<sup>2</sup> の酸素イオンをエネルギーを段階的に変えながら注入し、シリコン基板中に厚さ約150nmの埋め込み酸化膜を得た例である。まず、一連の酸素イオン注入後に得る加算累積した酸素原子濃度の深さ方向の分布をガウス分布、すなわち、 $C(z) = C_0 / (2\pi)^{0.5} \sigma \times \exp(-(z-z_0)^2 / 2\sigma^2)$  とした。ここで、 $C(z)$  は深さ  $z$  での酸素原子濃度、 $C_0$  は単位面積当たりの全イオン注入量、 $\sigma$  は分布の標準偏差、 $z_0$  は酸素原子濃度が最大となる深さである。この例では、 $C_0 = 6.72 \times 10^{17}$  イオン/cm<sup>2</sup>、 $\sigma = 124$  nm、 $z_0 = 300$  nmとした。酸素原子の最大濃度は  $C_0 / (2\pi)^{0.5} \sigma$  であるので、 $2.16 \times 10^{13}$  原子/cm<sup>3</sup> である。次に、酸素イオンの注入エネルギーを11

0、140、170、200 keV の 4 段階とし、各々の注入エネルギーでの酸素イオン注入量を  $1.40 \times 10^{17}$ 、 $1.60 \times 10^{17}$ 、 $1.78 \times 10^{17}$ 、 $1.94 \times 10^{17}$  イオン/cm<sup>2</sup> として、温度を 600℃ に保ったシリコン基板に一連の酸素イオン注入を行なった。その際、シリコン基板に注入された酸素原子濃度の横方向の分布を均一にするために、酸素イオンビームをシリコン基板表面全面にわたって均一に走査した。酸素注入後のシリコン基板中の酸素原子濃度の深さ方向の分布を 2 次イオン質量分析法により測定した結果を図 7 に示す。ほぼ、予め予定したガウス分布に一致した分布が得られ、酸素原子濃度の最大値は  $2.16 \times 10^{21}$  原子/cm<sup>3</sup> となっている。このシリコン基板を電気炉に入れ、酸素を 0.5% 含むアルゴンガス雰囲気中で温度 1330℃ で 6 時間熱処理した。熱処理後、このシリコン基板をフッ化水素酸水溶液に浸漬して、熱処理中に成長した表面の厚さ約 82 nm のシリコン酸化膜で除去し、このシリコン基板の断面構造を透過型電子顕微鏡で観察した。その結果、最表面に厚さ約 213 nm の単結晶シリコン層、その下に厚さ約 150 nm の埋め込み酸化膜、その下にシリコン基板が観察された。埋め込み酸化膜は連続かつ均質であり、シリコン粒子の包含も認められなかった。最表面の単結晶シリコン層中の転位密度を計数するために、最表面の単結晶シリコン層の上にさらに厚さ約 5 μm の単結晶シリコン層を熱 CVD 法によってエピタキシャル成長させた後、ライトエッチング液に 90 秒浸漬して、結晶欠陥を顕在化させた。光学顕微鏡下で転位密度を計数した結果は 600ヶ/cm<sup>2</sup> であった。本例では、一連の酸素イオン注入後に得る加算累積した酸素原子濃度の深さ方向の分布をガウス分布にとったが、本発明では、単一の極大値を有する連続的な分布であれば良い。

#### 【0027】実施例 2

実施例 1 と同様に、シリコン基板に全注入量  $2.24 \times 10^{17}$  イオン/cm<sup>2</sup> の酸素イオンをエネルギーを段階的に変えながら注入し、シリコン基板中に厚さ約 50 nm の埋め込み酸化膜を得た例である。酸素イオンの注入エネルギーを 60、80、100、120 keV の 4 段階とし、各々の注入エネルギーでの酸素イオン注入量を  $4.35 \times 10^{16}$ 、 $5.26 \times 10^{16}$ 、 $6.05 \times 10^{16}$ 、 $6.74 \times 10^{16}$  イオン/cm<sup>2</sup> として一連の酸素イオン注入を行った。酸素注入後のシリコン基板中の酸素原子濃度の深さ方向の分布を図 8 に示す。酸素原子濃度の最大値は深さ約 110 nm のところで  $1.01 \times 10^{21}$  原子/cm<sup>3</sup> となっている。このシリコン基板を電気炉に入れ、酸素を 0.5% 含むアルゴンガス雰囲気中で温度 1330℃ で 6 時間熱処理したところ、厚さ約 58 nm の単結晶シリコン層と厚さ約 50 nm の連続かつ均質な埋め込み酸化膜からなる SOI 構造が得られた。単結晶シリコン層の転位密度は約 500ヶ/cm<sup>2</sup> であ

った。

#### 【0028】実施例 3

シリコン基板に全注入量  $1.0 \times 10^{18}$  イオン/cm<sup>2</sup> の酸素イオンを注入エネルギーを 345 keV から 85 keV まで連続的に変えながら注入し、シリコン基板中に厚さ約 223 nm の埋め込み酸化膜を得た例である。酸素イオン注入のビーム電流を一定に保つことにより単位時間当たりの注入量は一定にし、注入エネルギーを掃引する速さを変えることにより、刻々の注入エネルギーに対する注入量を図 9 A のように連続的に変化させた。酸素注入後のシリコン基板中の酸素原子濃度の深さ方向の分布を 2 次イオン質量分析法により測定した結果を図 9 B に示す。酸素イオンの平均注入深さは約 413 nm、酸素原子の最大濃度は約  $2.14 \times 10^{21}$  原子/cm<sup>3</sup> である。このシリコン基板を 1380℃ の酸素濃度 0.5% のアルゴンガス雰囲気中で 4 時間熱処理したところ、厚さ約 302 nm の単結晶シリコン層と厚さ約 223 nm の連続かつ均質な埋め込み酸化膜からなる SOI 構造が得られ、単結晶シリコン層の転位密度は約 700ヶ/cm<sup>2</sup> であった。

#### 【0029】実施例 4

シリコン基板の表面をエッチングにより削ることによって、酸素イオンの注入深さを変え、全酸素イオン量  $2.0 \times 10^{17}$  /cm<sup>2</sup> を注入エネルギー 60 keV で注入し、シリコン基板中に厚さ約 44 nm の埋め込み酸化膜を得た例である。酸素イオンを  $5 \times 10^{16}$  イオン/cm<sup>2</sup> 注入する毎にシリコン基板をアンモニアと過酸化水素の混合水溶液に浸漬してシリコン基板表面を 10 nm を湿式化学エッチングによって取り除き、引き続き残りの注入量を注入した。酸化イオン注入後のシリコン基板中の酸素原子濃度の深さ方向の分布を図 10 に示す。酸素原子濃度の最大は深さ約 100 nm にあり、最大濃度は約  $1.55 \times 10^{21}$  原子/cm<sup>3</sup> であった。シリコン基板表面をエッチングで取り除いたことと、酸素イオン注入中にシリコン基板表面がイオンビームによってスパッタリングされたこととによって注入イオン量の約 2.5% がシリコン基板表面とともに取り去られた。このシリコン基板を 1330℃ の酸素濃度 0.5% のアルゴンガス雰囲気中で 6 時間熱処理したところ、厚さ約 49 nm の単結晶シリコン層と厚さ約 44 nm の連続かつ均質な埋め込み酸化膜からなる SOI 構造が得られた。単結晶シリコン層の転位密度は約 400ヶ/cm<sup>2</sup> であった。

#### 【0030】実施例 5

シリコン基板の表面に化学蒸着により多結晶シリコン膜を堆積することによって、酸素イオンの注入深さを変え、全酸素イオン量  $8.0 \times 10^{17}$  イオン/cm<sup>2</sup> を注入エネルギー 200 keV で注入し、シリコン基板中に厚さ約 178 nm の埋め込み酸化膜を得た例である。酸素イオンを  $1 \times 10^{17}$  イオン/cm<sup>2</sup> 注入する毎にシリコン基板の表面に約 60 nm の多結晶シリコン膜を化学

蒸着によって堆積し、引き続き残りの注入量を注入した。酸素イオン注入後のシリコン基板中の酸素原子濃度の深さ方向の分布を図 11 に示す。酸素原子濃度の最大は深さ約 220 nm にあり、最大濃度は約  $1.80 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> であった。このシリコン基板を 1330℃ の酸素濃度 0.5% のアルゴンガス雰囲気中で 6 時間熱処理したところ、厚さ約 135 nm の単結晶シリコン層と厚さ約 178 nm の連続かつ均質な埋め込み酸化膜からなる SOI 構造が得られた。単結晶シリコン層の転位密度は約 400 ケ/cm<sup>2</sup> であった。

#### 【0031】

【発明の効果】以上、説明したように本発明によれば、40 nm から 200 nm 以上の厚さの均質で連続な埋め込み酸化膜を有し、かつ埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン膜中の転位密度が  $10^3$  個/cm<sup>2</sup> 以下である高品質な SOI 構造を有する半導体基板を製造することができる。したがって、この半導体基板を用いて、例えば、相補型 MIS トランジスタあるいはバイポーラトランジスタなどのシリコン半導体デバイスを製造すると、リーク電流の少ない、また、絶縁耐圧に優れた高性能なデバイスが実現できる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】 図 1 A は、本発明による半導体基板の製造方法を説明する工程の断面図である。図 1 B は、本発明による半導体基板の製造方法においてイオン注入した酸素原子濃度分布がとるべき条件を説明する図面である。図 1 C は、本発明による半導体基板の製造方法を説明する工程の断面図である。

【図 2】 図 2 A は、本発明による半導体基板の製造方法において酸素イオンの注入深さを変える第 2 の方法を説明する工程の断面図である。図 2 B は、本発明による半導体基板の製造方法において酸素イオンの注入深さを変える第 3 の方法を説明する工程の断面図である。

【図 3】 図 3 A は、本発明による半導体基板の製造方法において一連の酸素イオンの注入深さと注入イオン量を決める方法を説明する図面である。図 3 B は、本発明による半導体基板の製造方法において一連の酸素イオンの注入深さと注入イオン量を決めて酸素イオン注入装置を制御する方法を説明する図面である。

【図 4】 図 4 A は、酸素原子濃度の最大値と埋め込み酸化膜上の単結晶シリコン層中の転位密度との関係を示す特性図である。図 4 B は、酸素原子濃度の最大値が  $4 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> を越える場合の酸素イオン注入後の基板の断面図である。図 4 C は、酸素原子濃度の最大値が  $4 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> を越える場合の熱処理後の基板の断面図である。

【図 5】 図 5 A は、酸素原子濃度の最大値と埋め込み酸化膜の形態との関係を示す区分図である。図 5 B は、酸素原子濃度の最大値が  $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> より多く  $4 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下である場合の酸素

イオン注入後の基板の断面図である。図 5 C は、酸素原子濃度の最大値が  $2.25 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> より多く  $4 \times 10^{11}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下である場合の熱処理後の基板の断面図である。

【図 6】 酸素原子濃度の分布曲線の形状が埋め込み酸化膜の形態に及ぼす影響を説明する図面である。

【図 7】 本発明による半導体基板の製造方法の第 1 の実施例を説明する図面である。

【図 8】 本発明による半導体基板の製造方法の第 2 の実施例を説明する図面である。

【図 9】 図 9 A は、本発明による半導体基板の製造方法の第 3 の実施例において酸素イオンの注入エネルギーと酸素イオンの注入量との関係を説明する図面である。図 9 B は、本発明による半導体基板の製造方法の第 3 の実施例を説明する図面である。

【図 10】 本発明による半導体基板の製造方法の第 4 の実施例を説明する図面である。

【図 11】 本発明による半導体基板の製造方法の第 5 の実施例を説明する図面である。

#### 【符号の説明】

- 1…半導体シリコン基板、
- 2…イオン注入により生じた結晶欠陥を多数含むシリコン層、
- 2'…単結晶シリコン層、
- 3…酸素イオンの注入領域、
- 3'…化学量論的シリコン酸化膜すなわち埋め込み酸化膜、
- 4…注入深さが異なる個々のイオン注入で得られる酸素原子濃度分布、
- 5…一連の個々のイオン注入を加算累積した酸素原子濃度分布、
- 6…取り除く表面シリコン層、
- 7…シリコン基板に堆積した膜、
- 8, 9, 10, 11…演算装置、
- 12…酸素イオン注入装置の制御器、
- 13…変換器、
- 14…演算装置 8 の入力すなわち一連の酸素イオン注入条件すなわち注入エネルギー、注入イオン量、シリコン基板表面に堆積する膜の物質名と膜厚、シリコン表面の取り除き量、
- 15…演算装置 8 の出力で演算装置 9 の入力すなわちシリコン基板中の酸素原子濃度分布、
- 16…演算装置 9 の出力で演算装置 10 の入力すなわち一連の酸素イオン注入について加算累積した酸素原子濃度分布、
- 17…演算装置 10 の入力すなわち得たい酸素原子濃度分布あるいは本発明が規定するところの酸素原子濃度分布が満足すべき条件、
- 18…演算装置 10 の出力で演算装置 11 の入力すなわち演算装置 10 から出力される判定結果と加算累積され



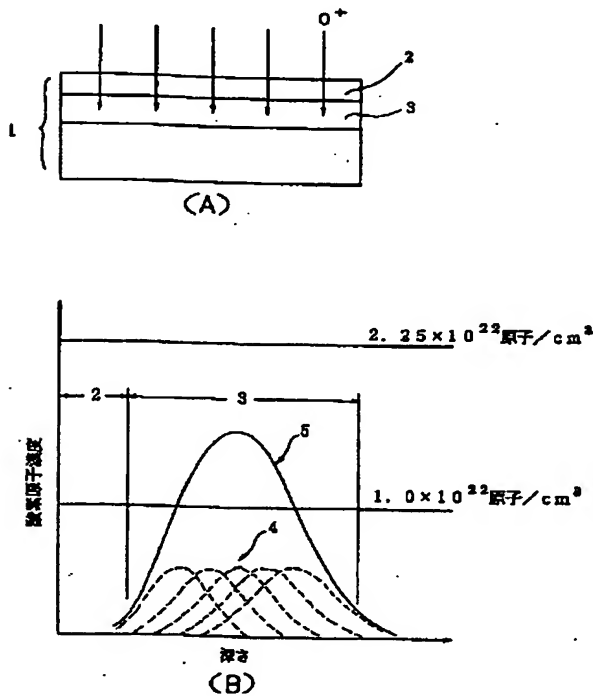
た原子濃度分布と本発明が規定するところの酸素原子濃度分布が満足すべき条件との差、

- 19…決定した一連の酸素イオン注入条件、
- 20…修正した一連の酸素イオン注入条件、
- 21…酸素イオン注入装置の制御器の入力、
- 22…非化学量論的なシリコン酸化膜、
- 23…転位、
- 24…酸素原子濃度の最大値が $1.0 \times 10^{22}$  原子/cm<sup>3</sup> 未満である範囲、
- 25…酸素原子濃度の最大値が $2.25 \times 10^{22}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下かつ $1.0 \times 10^{22}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上である範囲、
- 26…酸素原子濃度の最大値が $2.25 \times 10^{22}$  原子/cm<sup>3</sup> 以上である範囲、

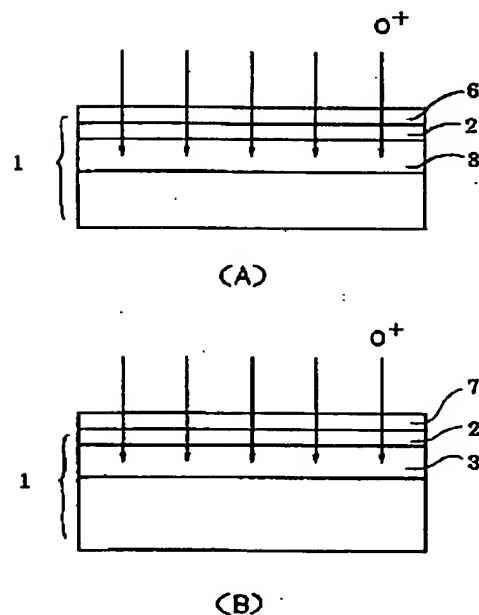
cm<sup>3</sup> より多くかつ $4.0 \times 10^{22}$  原子/cm<sup>3</sup> 以下である範囲、

- 27…酸素原子濃度の最大値が $4.0 \times 10^{22}$  原子/cm<sup>3</sup> を越える範囲、
- 28…SiO<sub>2</sub> に富んだ領域、
- 28'…シリコン粒子を包含した埋め込み酸化膜、
- 29…Si に富んだ領域、
- 29'…シリコン粒子、
- 30…SiO<sub>2</sub> に富んだ領域28とSiに富んだ領域29との混合層、
- 31, 32…酸素原子濃度が極大ピークをとる点、
- 33, 34…析出物の領域、
- 35…シリコン層の領域。

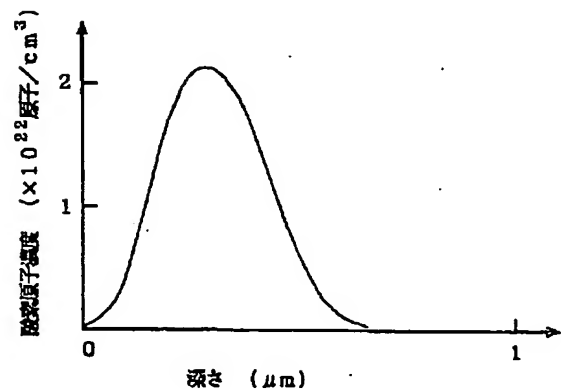
【図1】



【図2】

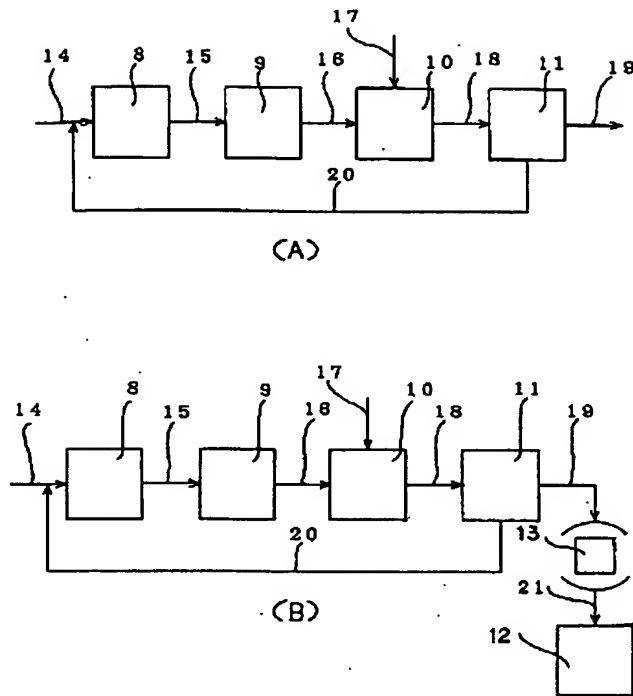


【図7】

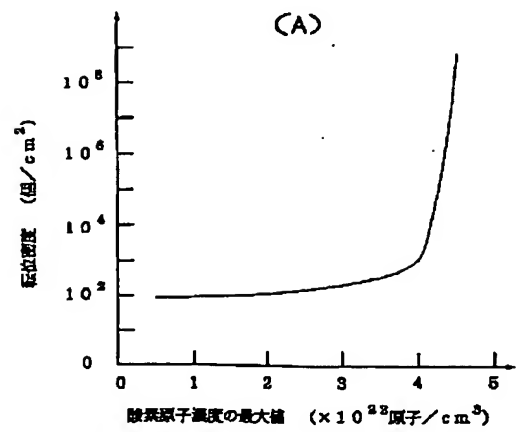




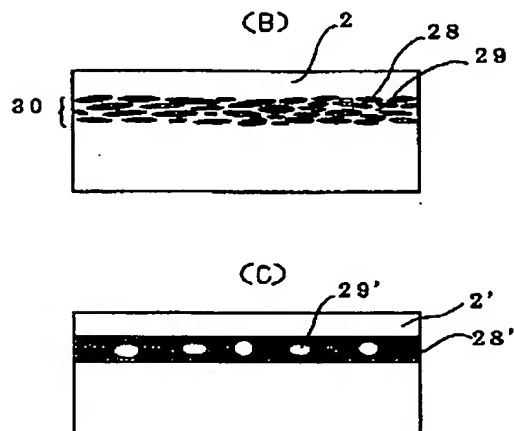
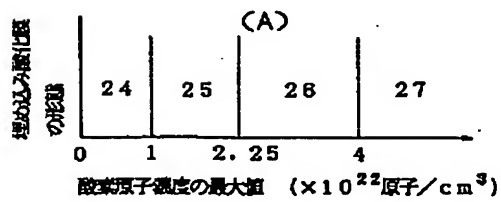
【図 3】



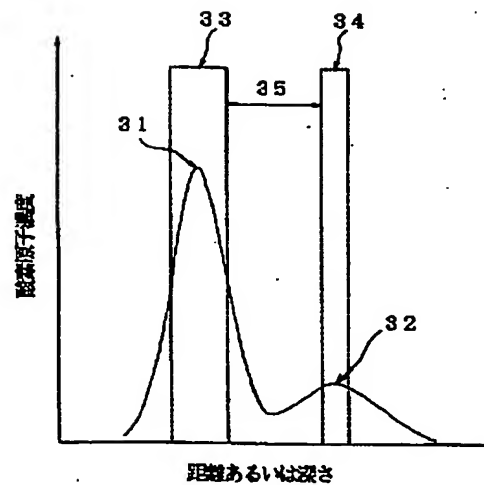
【図 4】



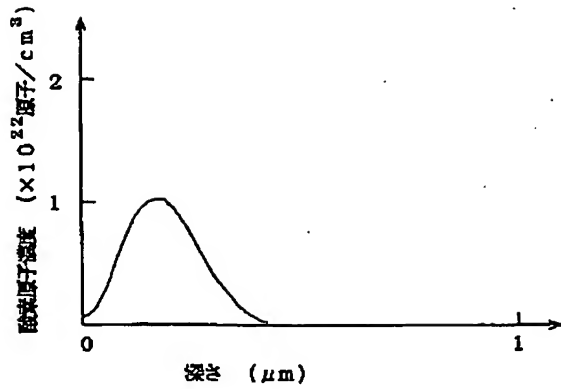
【図 5】



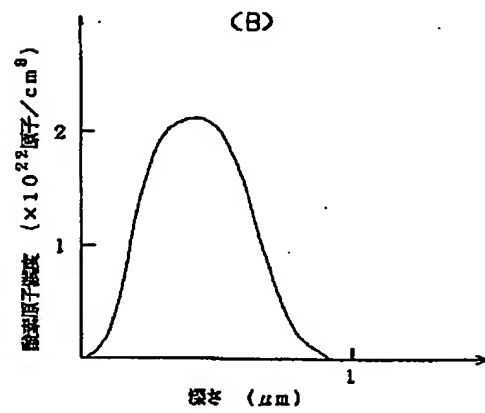
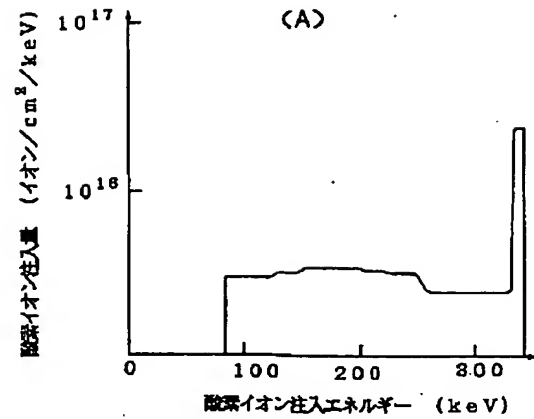
【図 6】



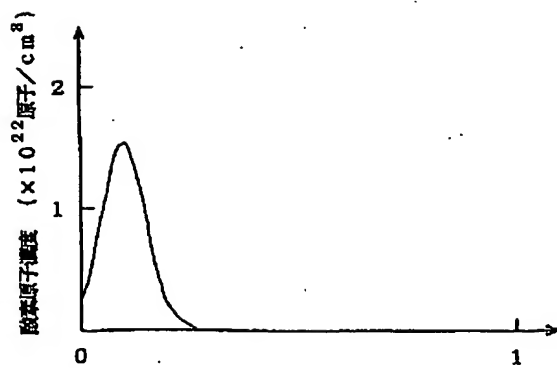
【図8】



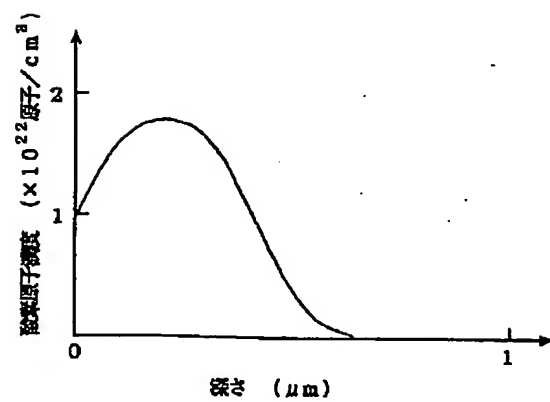
【図9】



【図10】



【図11】



フロントページの続き

(72)発明者 中島 辰雄  
 山口県光市大字島田3434番地 新日本製鐵  
 株式会社光製鐵所内